

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## STAVBA 3D TISKÁRNY

CONSTRUCTION OF A 3D PRINTER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Hanzlíček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Ctibor

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Martin Hanzlíček

**ID:** 183931

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Stavba 3D tiskárny

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte model navržené 3D tiskárny v některém z 3D návrhářských programů
2. Navrhněte a dimenzujte elektrické pohony
3. Vytvořte schéma zapojení
4. Fyzicky sestavte tiskárnu dle návrhu

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Low-cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development; Dostupné z <http://sdu.ictp.it/3D/book.html>
- [2] KOLACNY, Josef. Elektrické mikropohony. Brno, 173 s. Skriptum. VUT FEKT.
- [3] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 9788026067801.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 22.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Ctibor

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá tematikou 3D tisku. Více prostoru je zde věnováno FDM technologii, jelikož ta bude použita v samotném návrhu. Dále práce obsahuje popis základních komponent 3D tiskárny. Popisu motorů užitých pro pohony 3D tiskáren. Řízení této 3D tiskárny již řešil vedoucí této bakalářské práce v jeho diplomové práci. Praktická část této práce se zabývá návrhem konstrukce mechanicky 3D tiskárny, dimenzováním elektrických pohonů, návrhem schématu zapojení a samotnou realizací 3D tiskárny.

## KLÍČOVÁ SLOVA

3D tiskárna, FDM, RepRap, Aditivní výroba

## ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with topic 3D printers. Thesis includes overview of base technologies for 3D printing. There is more information about FDM technology, which is used in this project. There are chapters describing all important components and description of electronics drives. The control electronics was made by leader of this Bachelor thesis in his Master thesis. The practical part of this thesis deals with the design of mechanical 3D construction, dimensioning of electric drives, design wiring diagram and realization of 3D printer itself.

## KEYWORDS

3D printer, FDM, RepRap, Additive manufacturing

HANZLÍČEK, Martin. *Konstrukce 3D tiskárny*. Brno, Rok, 69 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Jiří Ctibor

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Konstrukce 3D tiskárny“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Ctiborovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Historie 3D tisku</b>	<b>13</b>
<b>2 Technologie 3D tisku</b>	<b>14</b>
<b>3 Přehled technologií aditivní výroby</b>	<b>15</b>
3.1 Princip 1 – materiál je vytlačován tiskovou hlavou . . . . .	15
3.2 Princip 2 – tekutý materiál je vytvrzován v definované vrstvě . . . . .	16
3.3 Princip 3 – materiál je pojen pomocí lepidla, laseru apod. na podložce	17
3.4 Princip 4 – oddělování materiálu v každé vrstvě . . . . .	17
<b>4 Technologie FMD</b>	<b>18</b>
4.1 Komponenty 3D tiskárny . . . . .	18
4.1.1 Nosná deska . . . . .	18
4.1.2 Tisková hlava . . . . .	19
4.1.3 Hobbed Gear - Hnací kolo . . . . .	20
4.1.4 Idler Gear . . . . .	20
4.1.5 Vyhřívání v horkém konci tiskové hlavy . . . . .	21
4.1.6 Termistor / termočlánek . . . . .	21
4.1.7 Tryska . . . . .	22
4.1.8 Závitové tyče . . . . .	22
4.1.9 Linearsety . . . . .	23
4.1.10 Řemen . . . . .	23
4.1.11 Krokové motory . . . . .	23
4.1.12 Síťový napájecí zdroj . . . . .	24
4.2 Materiály filamentu . . . . .	24
4.2.1 PLA – Polylactic Acid . . . . .	24
4.2.2 ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene . . . . .	25
4.2.3 Nylon . . . . .	25
4.2.4 PET – Polyethylene terephthalate . . . . .	26
4.2.5 PP – PolyPropylene . . . . .	26
<b>5 Projekt RepRap</b>	<b>27</b>
5.1 RepRap 3D tiskárny . . . . .	27
<b>6 Kinematiky 3D tiskáren</b>	<b>29</b>
6.1 Kartézská kinematika . . . . .	29

6.2	Delta kinematika . . . . .	29
6.3	Polární kinematika . . . . .	30
6.4	Scara kinematika . . . . .	31
<b>7</b>	<b>Pohony CNC strojů</b>	<b>32</b>
7.1	Stejnoseměrné elektromotory . . . . .	32
7.2	Bezkontaktní elektronicky komutované elektromotory . . . . .	32
7.3	Synchronní elektronicky komutované elektromotory . . . . .	32
7.4	Asynchronní elektronicky komutované elektromotory . . . . .	33
7.5	Krokové motory . . . . .	33
<b>8</b>	<b>Parametry tiskárny</b>	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>Rám zařízení</b>	<b>38</b>
<b>10</b>	<b>Návrh os</b>	<b>39</b>
10.0.1	Návrh os X,Y . . . . .	39
10.0.2	Návrh osy Z . . . . .	40
<b>11</b>	<b>Dimenzování motorů</b>	<b>42</b>
11.1	Osa X a Y . . . . .	42
11.2	Osa Z . . . . .	43
<b>12</b>	<b>Návrh řemenic</b>	<b>44</b>
12.1	První návrh . . . . .	44
12.2	Druhý návrh . . . . .	44
12.3	Finální návrh . . . . .	45
<b>13</b>	<b>Návrh a realizace nosné desky</b>	<b>46</b>
13.1	Návrh nosné desky . . . . .	46
13.1.1	První návrh . . . . .	46
13.1.2	Finální návrh . . . . .	46
13.2	Řešení nosné desky . . . . .	47
<b>14</b>	<b>Návrh a realizace tiskové hlavy</b>	<b>48</b>
14.1	Návrh tiskové hlavy . . . . .	48
14.2	Realizace tiskové hlavy . . . . .	48
<b>15</b>	<b>Schéma zapojení</b>	<b>50</b>
15.0.1	Dimenzování kabelů . . . . .	50
<b>16</b>	<b>Rozpočet</b>	<b>51</b>



17 Plány do budoucna	52
18 Závěr	53
Literatura	54
Seznam symbolů, veličin a zkratk	56
Seznam příloh	57
A Příloha 1 - Vyhřívací okruhy	58
B Příloha 2 - Analogové vstupy	60
C Příloha 3 - Digitální vstupy	62
D Příloha 4 - Zapojení ventilátorů, RGB, Stop tlačítka	64
E Příloha 5 - Zapojení motorů	66
F Příloha 6 - Fotodokumentace	68

# SEZNAM OBRÁZKŮ

3.1	Technologie FDM. [4]	15
3.2	Technologie SLA. [4]	16
3.3	Technologie SLS. [4]	17
4.1	„cracking“ efekt ABS materiálu [6]	19
4.2	Tisková hlava [8]	19
4.3	Hobbed Gear - Hnací kolo [7]	20
4.4	Idler gear [7]	21
4.5	Vyhřívání hot end [7]	21
4.6	Tryska [7]	22
4.7	Závitová tyč [7]	23
4.8	Linearset [17]	23
4.9	Ozubený řemen [7]	24
4.10	Krokový motor [7]	25
6.1	Příklad kartézské kinematiky [11]	29
6.2	Příklad delta kinematiky [11]	30
6.3	Příklad polární kinematiky [12]	31
6.4	Příklad scara kinematiky [13]	31
7.1	Princip konstrukčního uspořádání krokového motoru s permanentním magnetem[15]	34
7.2	Možnosti zapojení krokových motorů [20]	35
7.3	Momentová charakteristika krokového motoru, [18]	36
9.1	Průřez tyče rámu [16]	38
9.2	Celkový pohled na rám	38
10.1	Návrh v CAD	39
10.2	Detail na osy X,Y	40
10.3	Detail na osu Z	41
12.1	První návrh řemenice	44
12.2	Druhý návrh řemenice, proškrtnutý obdélník vyznačuje místo ložisek	45
12.3	Finální návrh řemenice, proškrtnutý obdélník vyznačuje místo ložisek	45
13.1	Návrh nosné desky č. 1	47
13.2	Návrh nosné desky č. 2	47
13.3	Návrh nosné desky č. 3	47
14.1	Návrh skeletu tiskové hlavy	48
14.2	Zvolený extrudér Bulldog a E3D V6 hot end [19]	49
15.1	Řídící elektronika [19]	50
F.1	Detail na tiskovou hlavu	68
F.2	Pohled ze shora na osy X, Y	68

F.3	Detail na řemenici . . . . .	69
F.4	Uložení tiskové desky . . . . .	69

# SEZNAM TABULEK

16.1 Náklady na 3D tiskárnu . . . . .	51
---------------------------------------	----

# ÚVOD

Technologie 3D tisku se v dnešní době rychle vyvíjí. Není to tak dávno, co jsem četl v novinách o tom, jak si někdo vytiskl auto na 3D tiskárně. To jsou jistě technologie zatím velmi drahé, avšak poukazují na to, jak tato technologie má téměř neomezený potenciál. Americká armáda v dnešní době využívá 3D tiskáren pro výrobu náhradních dílů v jejich expedicích, protože je to výhodnější než zásobování náhradními díly na všelijaké stroje a zařízení.

Tento projekt se ovšem zabývá o něco levnější a dostupnější technologií, a tou je Fused Deposition Modeling (dále již jen FDM). Pomocí těchto tiskáren jde vytvářet prototypy a náhradní díly z kvalitních plastů. Cena samotného tisku je levná. Cena PLA plastu se dnes pohybuje okolo 30 \$ / kg. I samotná technologie je spojena s velkou open-source komunitou, a tak lze najít mnoho materiálů o tom, jak si vytvořit vlastní 3D tiskárnu.

Tato práce navazuje na předešlou diplomovou práci mého vedoucího, která měla za cíl vytvořit řídicí elektroniku pro danou 3D tiskárnu. Cílem této práce je prostudování teorie 3D tisku, navržení 3D modelu mechanické konstrukce 3D tiskárny v návrhářském programu, nadimenzovat elektrické pohony, vytvoření schématu zapojení a dle návrhu sestavit samotné zařízení.

První část se bude zabývat samotnou teorií 3D tisku. Zde bude obsažena historie 3D tisku a popis jednotlivých technologií 3D tisku. Detailněji se bude věnovat technologii FDM, která bude v konstruované tiskárně použita. Nasleduje popisy jednotlivých komponent, jež 3D bude využívat a také průzkum jednotlivých materiálů k tisku. Více je zde probrána i problematika pohonů CNC strojů, kam se 3D tiskárny řadí.

Konečná část je zaměřena na praktickou část této práce. Návrh bude vytvořen v programu Autodesk Inventor 2018. Při konstrukci bude snaha o využití co nejvíce dílů ke koupi, aby se nemusely zbytečně vytvářet součástky specificky pro tuto 3D tiskárnu. To zajišťuje jednoduché opravy do budoucna. Návrh bude proložen i samotnou realizací jednotlivých částí. Navázáno bude dimenzováním elektrických pohonů a vytvořením schématu zapojení 3D tiskárny.

# 1 HISTORIE 3D TISKU

3D tisk neboli aditivní výroba *additive manufacturing* (AM) je proces vytváření fyzického objektu pomocí modelovacích dat. Objekt je digitálně řezán do vrstev a tyto vrstvy jsou spojeny. V prvních technologiích se AM spojoval s většími průmyslovými stroji, zatímco 3D tisk byl prováděn v menším měřítku. Nyní se tisk AM a 3D tisk požívá zaměnitelně.

Prvotní kořeny 3D tisku spočívají ve fotografické plastice a topografii. V roce 1860 patentoval francouzský umělec François Willème fotografickou plastickou metodu. V tomto procesu je předmět umístěn v kruhové místnosti a fotografován současně 24 kamerami, které jsou v místnosti rovnoměrně rozmístěné. Dále pak sledoval 24 profilů pomocí frézy připojené k pantografu. Současně byly tyto profily vyřezány do dřeva. Nakonec sestavil tyto vrstvy dřeva a vytvořil fotografickou plastiku.

V roce 1892 J.E. Blather patentoval metodu AM ve stylu topografických map. Tento způsob výroby se zakládal na vrstvení jednotlivých voskových desek, výška jedné vrstvy se v té době rovnala výškové vzdálenosti vrstevnic v určitém měřítku.

Vznik 3D tisku, jak jej známe dnes, vznikl v roce 1984 kdy Charles Hull vynalezl stereo litografii. Metoda tisku, jež využívá UV světlo k vytvoření 3D objektu tím, že vytvoří vrstvu po vrstvě. V té době pracoval pro společnost, která používala ultrafialové světlo k umístění tenké vrstvy plastové díhy na desky a nábytek, ale Hull si uvědomil, že může tuto techniku modifikovat a použít k tisku pevných předmětů. Další rok Hull experimentoval s jeho nápadem a nakonec vyvinul systém, který používal fotopolymer, materiál, jež se změní z kapaliny na tuhou látku, když na něj svítí světlo. Jeho tvar může být tvarován a vrstven mnohokrát. Hull založil společnost 3D Systems v roce 1986, aby dále rozvíjel svou technologii. První stereo litografická aparatura byla prodána v roce 1988.

V osmdesátých letech však Charles Hull nebyl jediný, kdo pracoval na 3D technologii tisku. Jedna z dnešních prominentních technologií AM vyvinula S. Scott Crumpová v roce 1989. Pod tuto metodu je podepsáno mnoho jmen, včetně *Fused Deposition Modeling*, *Extrusion a Fused Fabricment Fabrication* (FFF). FFF 3D tiskárny vypadají jako automatizované tavné pistole. Jejich proces je následující:

Soubor objektu je buď stažen z online zdroje nebo vytvořen jako CAD soubor. Následně je uložen jako soubor *Stereolithography* (STL), který umožňuje jeho digitální krájení do vrstev. Soubor STL je přenesen do 3D tiskárny a plastové vlákno je přiváděno do vyhřívané tiskové hlavy. Roztavený plast je nanášen z hlavy vrstva po vrstvě na pohyblivou plošinu v osách x-y-z.

Hull oprávněně předpovídal, že bude trvat nejméně 25 let, než se jeho technologie dostane do domácností. [1]

## 2 TECHNOLOGIE 3D TISKU

3D tisk spadá pod pojem *Rapid Prototyping* (RP), to je skupina několika technik používaných pro rychlé zhotovení modelu, nebo součásti v daném měřítku. Sestavování vychází z podkladů vytvořených v trojrozměrných návrzích (CAD).

Mezi první RP je považována *Stereolithography*. Jak jsme si popsali v předešlé kapitole. Z toho lze jasně vidět odlišný přístup u frézování nebo soustružení. Tyto procesy jsou založené na odebírání materiálu z výchozího polotovaru.

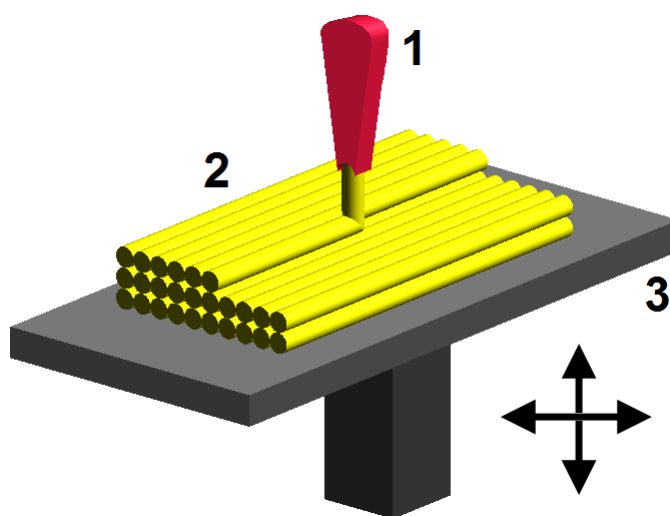
Additive manufacturing lze využít jak už pro výrobu prototypů, tak i pro automatizovanou výrobu. Výrobky lze využít jak pro zhmotněnou vizualizaci, tak i pro vývoj aerodynamického profilu v aerodynamickém tunelu. Využití této technologie je v dnešní době velmi široké, od šperkařství po medicínu.

Dnes nejrozšířenější technologií pro 3D tisk je *Fused Filament Fabrication* (FFF), označovaný také jako FDM. Jedna z nejjednodušších, a proto také populárních technologií. [2]

## 3 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ ADITIVNÍ VÝROBY

### 3.1 Princip 1 – materiál je vytlačován tiskovou hlavou

V případě, že je materiál vytlačován tiskovou hlavou, spočívá tisk v nanášení tiskového materiálu po vrstvách na tiskovou podložku. Při dokončení vrstvy se vždy posune tisková hlava (nebo podložka) o jednu vrstvu. Následně se princip opakuje. Typickými zástupci této skupiny jsou FDM, FFF, PJP a další. Technologie FDM neboli tisk tavenou strunou je nejlevnější a proto je pro širokou veřejnost dobře přístupný. Spektrum stavebních materiálů je široké a stále se zvětšuje, což je další nespornou výhodou. Nevýhodami jsou dlouhý čas tisku a nepřesnost tisku. Jiná technologie MJP (Multi Jet Printing), která se používá v profesionální sféře. Tiskový materiál tryská pomocí otvorů tiskové hlavy, která zároveň vytváří voskové podpěry. Výtisk má vysokou přesnost detailu a rozměru. Odplavení voskových podpěr probíhá automaticky v příslušné jednotce. Následné dokončovací operace jsou minimální nebo žádné. [3, 4]

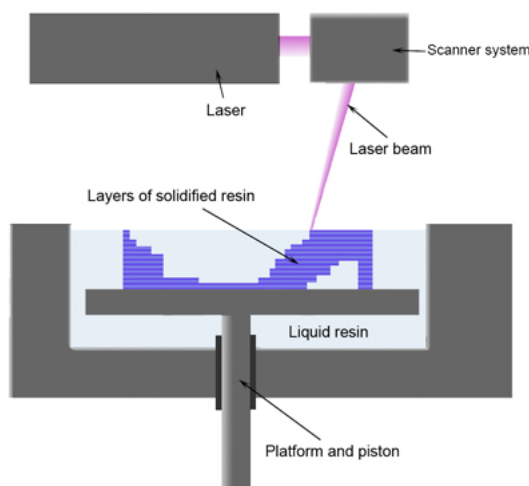


Obr. 3.1: Technologie FDM. [4]



## 3.2 Princip 2 – tekutý materiál je vytvrzován v definované vrstvě

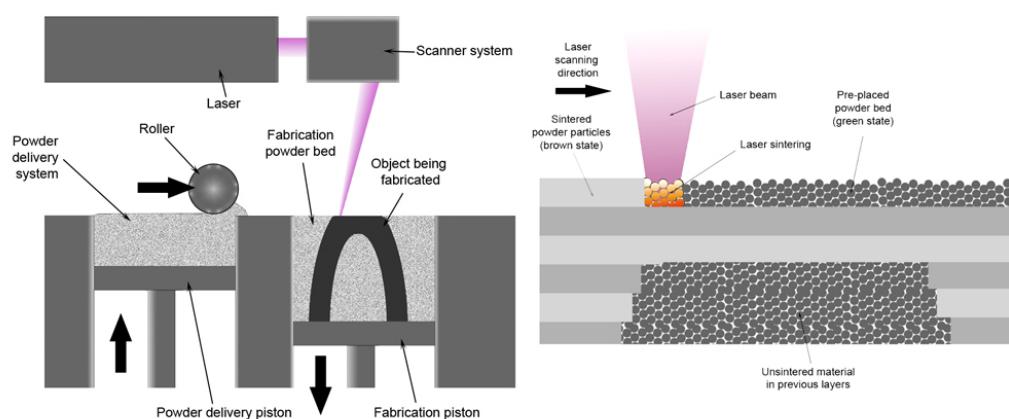
V nádobě s tekutým polymerem se nachází posuvná tisková deska, jejíž úroveň vůči hladině polymeru určuje výšku požadované tiskové vrstvy. Pomocí světelného paprsku se vykreslí požadovaný tvar, čímž dojde k vytvrzení polymeru v daném tvaru. Následně se tisková deska posune a celý proces se opakuje. Příkladem tohoto principu je SLA. Tiskovým materiálem je tekutý polymer, který je vytvrzován laserem nebo DPL projektorem. Zhotovený výtisk je následně třeba omýt v izopropylalkoholu a dodatečným UV světlem definitivně vytvrdit. SLA je jedna z nejpřesnějších technologií. [3, 4]



Obr. 3.2: Technologie SLA. [4]

### 3.3 Princip 3 – materiál je pojen pomocí lepidla, laseru apod. na podložce

Na tiskové desce je rozprostřen stavební materiál ve formě prášku. Tvar požadované vrstvy modelu je vytvrzen pomocí laseru nebo lepidla. Tisková deska se posune o úroveň definované výšky, nanese se další vrstva prášku a laser či lepidlo vytvrdí požadovaný tvar. Tento princip je hojně využíván technologiemi SLS *Selective Laser Sintering*, CJP *Color Jet Printing* a DMP *Direct Metal Printing*. Stavebním materiálem je dle technologie celá škála plastů, kovů a prášků na bázi sádry. Technologie CJP je v současnosti nejrychlejší a jedinou, která dokáže vytisknout téměř fotorealistický 3D model. [3, 4]



Obr. 3.3: Technologie SLS. [4]

### 3.4 Princip 4 – oddělování materiálu v každé vrstvě

Technologie LOM *Laminated Object Manufacturing* využívá materiál k tvorbě v podobě papíru nebo fólie. V tomto principu jsou vždy vyříznuty jednotlivé vrstvy a následně jsou přilepeny na předchozí vrstvu. Podání dalšího materiálu bývá v podobě role nebo zásobníku na formáty A4, A3 apod. Není to tisknutí ale vyřezávání, avšak stále to je aditivní výrobní proces. Tato technologie je výrobcí nejméně aplikována. [3, 4]

## 4 TECHNOLOGIE FMD

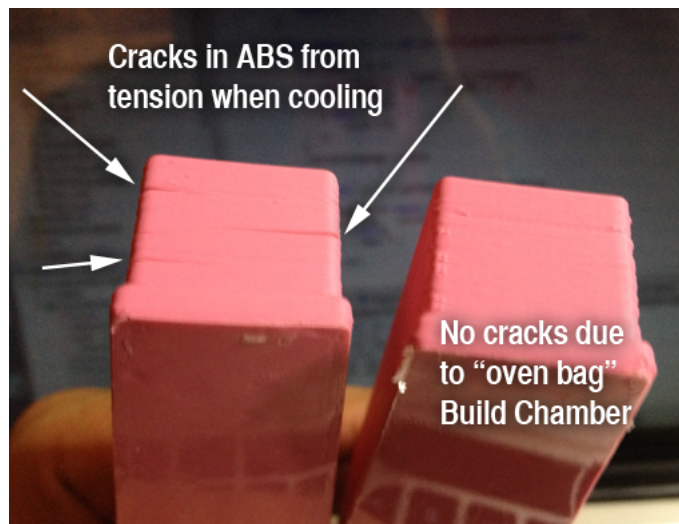
*Fused Deposition Modeling* (FDM) je nejvíce rozšířená technologie v 3D tisku. Vyrábět díly lze z mnoha materiálů včetně elastomerů, ABS *akrylonitril butadien styren* a vosků na lití. V samotném procesu fabrikace modelu je plast natlačen do tiskové hlavy, kde je roztaven. Zkapalněný plast se pak přivádí tryskou na právě konstruovanou část. Samotný filament je tlačén ještě tuhým kusem plastu, jež funguje jako píst. Tisková hlava se pohybuje v rovinách X-Y a materiál se ukládá dle potřeby. Po dokončení vrstvy se buď posune hlava nebo podložka s modelem v ose Z. Pak se proces opakuje až do dokončení. Výsledný produkt nepotřebuje žádné další dotvrzování. Tisková hlava většinou mívá druhou trysku, jež se stará o konstrukci podpůrných kontrakcí pro převísle úhly menší než  $45^\circ$  od horizontální roviny. Následně po zhotovení jsou podpůrné konstrukce odstraněny nebo rozpuštěny. [5]

### 4.1 Komponenty 3D tiskárny

#### 4.1.1 Nosná deska

Velikost nosné desky bývá dána možnostmi kinematiky dané tiskárny. Pro většinu amatérských tiskáren se jedná o rozměr 20 x 20 cm. Na nosné desce se tiskne žádaný objekt. Typicky bude skleněný a bude obsahovat topný element. Pod topným elementem bývá izolační vrstva. Většinou se používá korek, silikon, bavlna a podobně. Ochranná vrstva by měla mít dobrou tepelnou vodivost a velmi hladký povrch. Používá se sklo, keramika nebo leštěný kov. Sklo pro tisk ABS plastem nebývá dostatečující, a proto se potahuje kapton páskou. V amatérském světě se používá lak na vlasy. Aby se výsledný produkt nepřilepil k desce. Většina nosných desek bývá vyhřívána, aby se zabránilo tomu, že se předměty během chladnutí zkříví. Kvůli tepelné kontrakci se plast ve studenějších částech mírně smrskne. To způsobí, že se jednotlivé vrstvy nedokonale spojí a vytvoří zuby. Vyhřívání postele udržují předmět v teple, aby se tomuto jevu předešlo. [6]

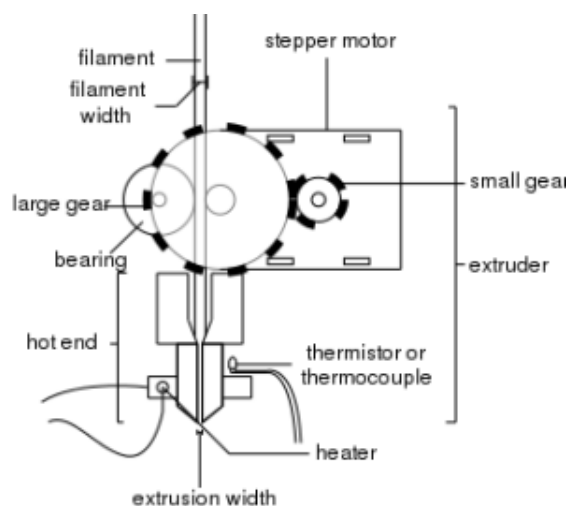
Pro tisk materiálem ABS je podložka vyhřívána na teplotu okolo  $100^\circ\text{C}$ . Teplota se zde řídí pomocí jednoduché regulace on/off. Samotný topný element bývá plošná deska vyplněná měděnými cestami. Desky se obvykle napájí 12 V nebo 24 V s výkony kolem 100 až 400 W. Vždy závislé na velikosti tiskárny a daném filamentu. Některé tiskárny nemají vyhřívání. To omezuje jejich výběr materiálu k tisku. Většinou využívají materiálů jako PLA nebo PET. [6]



Obr. 4.1: „cracking“ efekt ABS materiálu [6]

#### 4.1.2 Tisková hlava

Extrudér neboli tisková hlava je jádrem tiskárny. Zde se taví plastový filament a následně se nanáší v tenkých vrstvách na tisknutý objekt. Zde se nachází většina technických součástí tiskárny. Extrudér se skládá ze dvou částí: horký konec – hot end a studený konec – cold end. Cold end se skládá z motoru, jež zajišťuje pohyb filamentu. Hot end zajišťuje roztavení vlákna a skrze trysku dodání plastu na určené místo. [7]



Obr. 4.2: Tisková hlava [8]

Tiskárny s přímým pohonem jsou ty, kde je hot end a cold end jeden nad druhým.

Toto řešení má nevýhody v tom, že hlava jako taková je těžší. Pohon lze umístit i mimo hlavu tiskárny. Pak je tedy hot end a cold end oddělen. Cold end bude někde na rámu 3D tiskárny. A hot end musí být v tiskové hlavě. Tyto komponenty jsou spojeny pomocí bowdenu, ve kterém je tekutý filament dopravován. Výhodou je zde tedy menší hmotnost tiskové hlavy. Značnou nevýhodou je, že dávkování filamentu je méně přesné. [7]

#### 4.1.3 Hobbed Gear - Hnací kolo

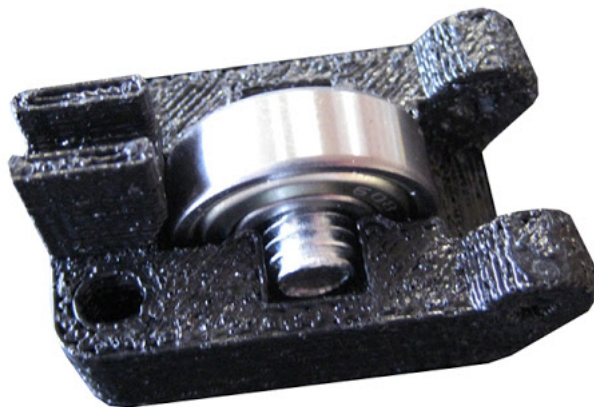
Hnací kolo je ozubené kolo, které zajišťuje dodávku filamentu. [7]



Obr. 4.3: Hobbed Gear - Hnací kolo [7]

#### 4.1.4 Idler Gear

Idler gear je pružinou napnuté kolo, jež působí vůči hnacímu kolu. Pomocí tohoto lze nastavit, kolik filamentu bude cold end dodávat. [7]



Obr. 4.4: Idler gear [7]

#### 4.1.5 Vyhřívání v horkém konci tiskové hlavy

Výhřev v hot endu, tedy ohřívá plast. Jedná se o odporový tepelný zdroj. Tento tepelný zdroj většinou bývá zapojen na 12 V nebo 24 V. [7]



Obr. 4.5: Vyhřívání hot end [7]

#### 4.1.6 Termistor / termočlánek

Jedná se o typy snímačů teploty hot endu. Termistory jsou nejčastějším typem pro jejich nízkou cenu a jednoduchost použití. Termočlánky se používají pro vyšší teploty. [7]

### 4.1.7 Tryska

Tryska nebo také nozzle. Je jednoduše kus kovu s malým otvorem na konci. Jednotlivé trysky bývají zaměnitelné a liší se ve velikostech výstupního otvoru. Normálně se používá velikost 0,4 mm, pro detailnější tisk se používají průměry menší. Pro rychlejší tisk zase větší. Ucpání trysky je jeden z nejčastějších problémů s 3D tiskárnami. [7]



Obr. 4.6: Tryska [7]

### 4.1.8 Závitové tyče

Závitové tyče se používají na pohyb osy Z. Nenákladné tiskárny používají jednoduché závitové tyče, což jsou v podstatě dlouhé šrouby. Pro vyšší přesnost se používají trapézové šrouby, u kterých si člověk může vybrat stoupavost závitu. [7]



Obr. 4.7: Závitová tyč [7]

#### 4.1.9 Linearsety

Linearsety jsou v podstatě vozíky. Ty se umísťují na vodící tyče a umožňují tak pohyb. Aby byl pohyb co nejvíce bez ztrátový. Uvnitř se nachází kuličkové pouzdro jež umožňuje hladší pohyb.



Obr. 4.8: Linearset [17]

#### 4.1.10 Řemen

Ozubené řemeny jsou použity pro pohon na osách X a Y. Spojují motor a pojezdy. Většina 3D tiskáren má nějaký způsob, jak upravit napnutí takového řemenu. [7]

#### 4.1.11 Krokové motory

Na rozdíl od běžných stejnosměrných motorů, které se při dané energii otáčejí plynule, se krokové motory otáčejí po krocích. To jim dává přesnou kontrolu nad jejich pozicí. Více o krokových motorech v kapitole 7.5. [7]





Obr. 4.9: Ozubený řemen [7]

#### 4.1.12 Síťový napájecí zdroj

Napájecí zdroj tedy převede síťové napětí 230 V AC na nižší napětí, na které je tiskárna konstruována. Většinou se používá 12 V a 24 V DC. [7]

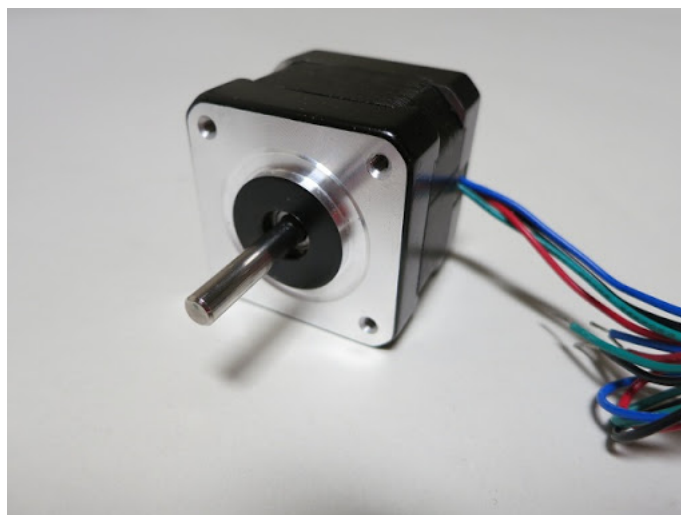
## 4.2 Materiály filamentu

Materiál pro tisk, též nazývaný *filament*. Jedná se o různé materiály, jež jsou popsány níže. Tiskárny užívají těchto materiálů navinutých na kilových cívkách. Průměry těchto drátů jsou 1,75 mm nebo 3 mm. Na trhu je spousta různých materiálů a barev. [9]

### 4.2.1 PLA – Polylactic Acid

Jeden z nejpoužívanějších materiálů. Jedná se o materiál vhodný pro ty, kteří chtějí s 3D tiskem začít. Jedná se o materiál vyrobený z obnovitelných zdrojů (škrob) a při tisku nezapáchá. Vyžaduje méně energie na zpracování s porovnáním k plastům na bázi ropy. Tento materiál v zásadě nepotřebuje k tisku vyhřívanou komoru. [9]

- Teplota: extrudéru  $205 \pm 15$  °C
- Teplota: nosné desky  $40 \pm 15$  °C
- Doporučený povrch desky: „modrá malířská páska“
- Charakteristika: PLA vlákno je tuhé, ale křehké. Použití pro prototypy, stolní hračky. Nejlepší materiál pro začátečníky.



Obr. 4.10: Krokový motor [7]

### 4.2.2 ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene

Další z řady nejpoužívanějších materiálů. Jedná se o materiál pevnější a tepelně odolnější než PLA. Po výtisku může být objekt upraven tak, aby dosáhl lesklého povrchu pomocí acetonu. Pro tisk s ABS se výrazně doporučuje mít vyhřívanou komoru na 100 °C. Nejvýznamnější zástupce použití tohoto materiálu je firma *LEGO*. [9]

- Teplota extrudéru:  $230 \pm 10$  °C
- Teplota nosné desky:  $90 \pm 10$  °C
- Doporučený povrch desky: Kapton páska, lak na vlasy
- Charakteristika: ABS materiál je silný, tvárný s dobrou odolností proti opotřebení a tepelnou odolností.

### 4.2.3 Nylon

Nylon je velmi silný, odolný a univerzální materiál. Tenká vrstva je flexibilní a s vysokou přilnavostí mezi vrstvami. Nylon je dobrý na pohyblivé části jako jsou závěsy. Nylonové vlákno se tiskne jako jasně přirozené bílé s průsvitným povrchem a dokáže pohlcovat přidané barvy post-procesu s nejběžnějšími oděvními barvami na bázi kyselin nebo barvami z umělých tkanin. Nylonové vlákno je extrémně citlivé na vlhkost, proto se doporučuje, aby se při skladování a při tisku využilo vysoušečů, vakua nebo zvýšené teploty. Taulman je snad jediná firma jež toto vyrábí. [9]

- Teplota extrudéru:  $255 \pm 15$  °C
- Teplota nosné desky:  $70 \pm 10$  °C
- Doporučený povrch desky: PVA-Based Glue
- Charakteristika: Nylon je silný a pružný. Cenově dražší. Komplikované skladování.

#### 4.2.4 PET – Polyethylene terephthalate

Je těžké najít čisté PET, většinou se vyrábí s nějakou sloučeninou. Nejčastěji PETG. Toto vlákno kombinuje snadné použití PLA vlákna se silou a trvanlivostí ABS. Jeho pevnost je mnohem vyšší než PLA a je schválena FDA pro potravinářské nádoby. Při tisku se nezkroutí jako ABS a nevyvolává žádné pachy ani výpary. PET není biologicky odbouratelné, ale je recyklovatelné. [9]

- Teplota extrudéru:  $245 \pm 10$  °C
- Teplota nosné desky:  $60 \pm 10$  °C
- Doporučený povrch desky: „modrá malířská páska“
- Charakteristika: PET vlákno je odolný a flexibilní 3D tiskový materiál s lesklou povrchovou úpravou a je odolný proti nárazu a teple.

#### 4.2.5 PP – PolyPropylene

Polypropylenové vlákno (PP) má řadu použití. Např. pro balení potravinářských krabic. Jeho schopnost se prodloužit bez přetržení je lepší než v případě PLA. Rovněž odolává lépe teple. [9]

- Teplota extrudéru:  $250 \pm 15$  °C
- Teplota nosné desky:  $110 \pm 10$  °C
- Doporučený povrch desky: Lepicí páska
- Charakteristika: Polypropylenové vlákno je flexibilní a chemicky inertní 3D tiskový materiál.

## 5 PROJEKT REPRAP

Myšlenka na vznik RepRapu vznikla v roce 2004, kdy Adrian Bowyer, přednášející na Univerzitě v Bathu, navrhl jeho myšlenku na samo-replikující stroj schopný produkovat většinu částí potřebných k vytvoření dalšího podobné stroje. Hlavním úkolem bylo najít technologie vhodné pro vytváření mechanických a konstrukčních součástí stejně, jako elektroniky. Rychlá prototypová technologie existovala po mnoho let a vyžadovala drahé, patentované profesionální stroje, které používají aditivní techniky pro vytváření pevných objektů. Nicméně použití takových strojů bylo přijatelné, pouze pro vytvoření součástí pro první stroj, takže samotný stroj potřeboval levnou a jednoduchou technologii pro výrobu sebe sama. [10]

Bowyerova myšlenka měla velký úspěch a malý tým začal pracovat na projektu. Tým pracoval na Universitě of Bath. Mezi lety 2006 a 2008 byl navržen první prototyp, který dokázal vytisknout vlastní díly: RepRap Darwin. Dále následovaly projekty Mendel a Huxley. Kolem roku 2010 už existovala rozsáhlá komunita na internetu, která si měnila návrh a možné nápady. Projekt RepRap se začal vyvíjet nezávisle na prvotním projektu. Lidé experimentovali s několika sub komponenty stroje: rám, elektronika, software, materiály na tisk, atd. Projekt už neměl jediný směr a žádné oficiální stroje nebyly vydány původním týmem. Tato situace byla ve skutečnosti druhým neoficiálním cílem. Proces spontánního vývoje. [10]

Důležitá změna se stala na podzim roku 2011, kdy mladý Josef Průša publikoval jeho Tiskárnu *Prusa Mendel*. Řekl, že je to "Ford model T" 3D tisku, protože zajišťoval silné a zjednodušené části rámu. *Prusa Mendel* je složen z věcí dostupných v místních obchodech a rychle se stala nejslavnější tiskárnou na světě. [10]

Zatímco mechanika a elektronika jsou základními součástmi 3D tisku a ovlivňují rychlost a přesnost, software je nezbytným doplňkem. Bez softwaru, takové stroje nemohly nic dělat. Logika stroje se nachází v softwaru, definuje potřebnou strategii pro koordinaci motorů, extruderů a ventilátorů za účelem výroby. *Slic3r* byl vytvořen na konci roku 2011 a měl nahradit stávající software pro RepRap. Bylo zapotřebí lepšího softwaru odpovídajícímu rychlosti vývoje mechaniky a elektroniky. *Slic3r* má také uživatelsky příjemnější prostředí, a tím jednodušší nastavování parametrů a přípravu tisku. [10]

### 5.1 RepRap 3D tiskárny

Tiskárny RepRap jsou založeny na technologii Fused Fabrication Fabrication. Tyto tiskárny dokáží obvykle vytvořit 20 - 30  $cm^3$  velký objekt, ačkoli není příliš obtížné vytvářet větší tiskárny. Existuje však několik problémů s většími tiskárnami. Ty jsou spojeny s deformacemi výrobků kvůli teplotní dilataci. Zejména s ABS materiály, kde

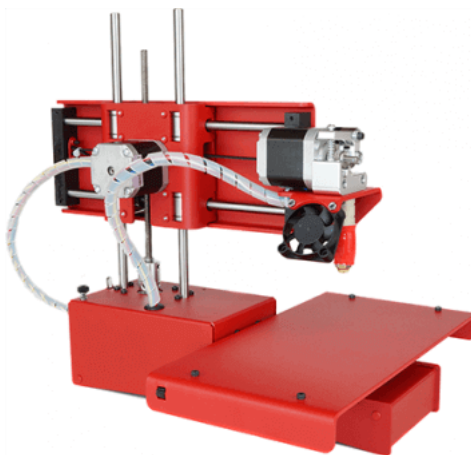
časy tisku dosahují několika dní. To představuje riziko, protože jakákoliv porucha by vedla k znehodnocení celého tisku. Proto se velké objekty obvykle rozdělují do drobnějších kusů, které mohou být sestaveny dohromady. [10]

Existuje široká škála řídicí elektroniky jak originální, tak i Arduino řešení s procesory Atmel nebo ARM čipy. Hlavní rozdíly řídicí elektroniky bývají v ceně. Tudiž s tím spojené kvalitě výroby, podpoře doplňkových funkcí a použití elektrických komponent. Z doplňkových funkcí stojí za zmínku LCD display, tisk z SD karty, podpora více extrudéru, atd. Hodně těchto řídicích systémů je dostupných jako open source. [10]

## 6 KINEMATIKY 3D TISKÁREN

### 6.1 Kartézská kinematika

Kartézské 3D tiskárny mají typicky tiskovou vrstvu, která se pohybuje pouze v ose Z. Extruder je umístěn na osách X a Y, kde se může pohybovat ve čtyřech směrech na portálu. Tento princip lze vidět v akci na populárních modelech od společnosti Ultimaker. Jedná se o mechanicky jednodušší konstrukci, a proto je lehčí na údržbu. Toto vše ale na úkor rychlosti tisku. [11]



Obr. 6.1: Příklad kartézské kinematiky [11]

### 6.2 Delta kinematika

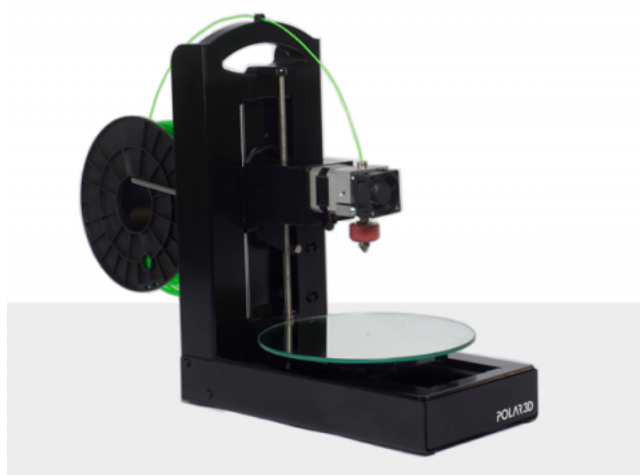
Dalším stylem, který roste v popularitě, je tiskárna Delta 3D. 3D tiskárny Delta pracují také v karteziánské rovině. Identifikace kinematiky začíná kruhovým tiskovým lůžkem. Extruder je zavěšen nad tiskovou vrstvou třemi rameny v trojúhelníkovém uspořádání, a proto jménem "Delta". Delta 3D tiskárny byly navrženy pro vyšší rychlost tisku. Liší se tiskovou vrstvou, která se nikdy nepohybuje, což může být užitečné pro určité tiskové úlohy. Někdy se však tvrdí, že tato kategorie tiskárny není tak detailní ani přesná jako karteziánská kinematika. [11]



Obr. 6.2: Příklad delta kinematiky [11]

## 6.3 Polární kinematika

Polární 3D tiskárny používají polární souřadnicový systém. Je to podobné kartézskému s výjimkou toho, že sady souřadnic popisují body na kruhové mřížce než na čtveraté. To vše znamená, že můžete mít tiskárnu s otočnou postelí a tiskovou hlavou, která se může pohybovat nahoru, dolů, doleva a doprava. Velkou výhodou polární 3D tiskárny je, že tiskárna může fungovat pouze se dvěma krokovými motory. Polární 3D tiskárny navíc mohou mít větší prostor pro tisk v rámci menších prostorů. Pohyb je poměrně hypnotický. Nemusí to vypadat tak intuitivně jako jiné návrhy, ale konečné výsledky jsou stejné. [11]



Obr. 6.3: Příklad polární kinematiky [12]

## 6.4 Scara kinematika

The Selective Compliance Assembly Robotic Arm (Scara) je velmi přesná kinematika, avšak zatím složitá pro veřejnost. Podobá se montážnímu robotovi na výrobní lince. [11]



Obr. 6.4: Příklad scara kinematiky [13]



## 7 POHONY CNC STROJŮ

### 7.1 Stejnosměrné elektromotory

Používají se výhradně motory s cizím buzením pomocí permanentních magnetů. Konstrukční řešení s kartáči a mechanickým komutátorem se nahrazuje elektronickou komutací.

Regulace otáček se provádí změnou napětí na kotvě pomocí polovodičového měniče (oblast konstantního momentu) nebo odbuzováním (oblast konstantního výkonu). Vazba otáček je provedena stejnosměrným tachodynamem. Této vazbě je nadřazen regulátor polohy (inkrementální snímač). Při použití permanentních magnetů odpadají Jouleovy ztráty, což je značně výhodné.

Motory rozlišujeme na ty s kotvou ze železa nebo bez železa. Motory s železem se dělají s drážkovanou nebo hladkou kotvou. Motory bez železa mají rotor složen z vodičů samostatně navinutých a lepených ve tvaru hrnce, s jehož dnem je spojen komutátor.

Z důvodu častého střídání pracovních režimů při rozběhu, brždění a reverzaci je nutné, aby napájecí obvod dovolil provoz ve čtyř kvadrantovém režimu. [14]

### 7.2 Bezkartáčové elektronicky komutované elektromotory

Tyto motory nepoužívají mechanický komutátor, ale jak již název napovídá, používají elektronickou komutaci. Permanentní magnety nese rotor a proud je přepínán do cívek statoru. Místo mechanického spínání kartáče s komutátorem se využívá spínání tranzistorů. Jejich řízení se provádí pomocí sledování okamžité polohy rotoru vůči statoru. Řízení je provedeno tak, aby platilo, že fázový posuv mezi tokem magnetů rotoru protínajícím cívky statoru a proudem cívkami je  $90^\circ$ . Motory jsou nejčastěji zapojeny do hvězdy kvůli menší proudové zátěži. [14]

### 7.3 Synchronní elektronicky komutované elektromotory

Jedná se o kvalitativně vyšší typ bezkartáčových elektromotorů založeném na řízení tří svorkových proudů, které mají harmonické průběhy. [14]

Výhody vůči DC motoru:

- Nemusí se udržovat komutátor.

- Nedochází k omezování výkonu – maximální moment je i při maximálních otáčkách.
- Motor se lépe chladí (ztráty jsou ve statoru).
- Dobré krytí IP 65.
- Otáčky nejsou omezovány mechanickým komutátorem.

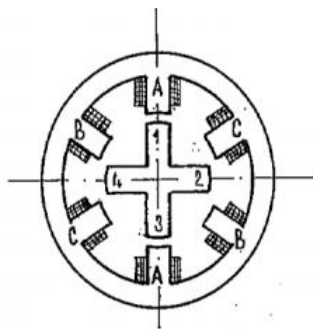
## 7.4 Asynchronní elektronicky komutované elektromotory

Využívá se asynchronních motorů s kotvou na krátko. Napájení statoru je provedeno pomocí tří harmonických proudů. Magnetické pole je zde tvořeno indukovanými proudy, které se do kotvy indukují vlivem skluzu. [14]

## 7.5 Krokové motory

Krokový motor je speciální synchronní motor, jež pracuje synchronně se vstupními impulsy. Když na vstup přijde jeden impuls, dojde k pootočení rotoru o určitý úhel (jeden krok) a motor se zastaví. Až s příchodem dalšího impulsu se motor zase pootočí. V případě že impulsy přicházejí postupně, s každým impulsem se motor pootočí a zastaví, takže motor „krokuje“ synchronně s impulsy. Z čehož vyplývá že celkový úhel natočení hřídele a rychlost otáčení jsou úměrné frekvenci vstupních impulsů. Při nízkých otáčkách je chod motoru trhavý, až od jisté frekvence vstupních impulsů je chod motoru plynulý. Když motor dosáhne maximální frekvence vstupních impulsů je motor na hranici synchronizmu a při zvyšování frekvence se motor zastaví. Krokový motor je schopen synchronně sledovat i skokovou změnu frekvence impulsů nepřesahující jistou velikost; buď naskočí se ztrátou kroků nebo se nerozběhne. Při skokovém snížení frekvence impulsů pak přeběhne synchronní polohu. Dojde-li k překročení maximálního momentu motoru, dojde k výpadku ze synchronizmu, tedy k takzvané ztrátě kroku. Princip činnosti je vysvětlen na obr. 7.1 [15]

Stator je třífázový šesti pólový, rotor má čtyři zuby (póly) bez vinutí. Rotor na obrázku 7.1 je v poloze po přivedení impulsu na cívkou fáze A. Přivedeme-li impuls na cívkou fáze B, pootočí se rotor tak, že póly 4, 2 budou pod póly odpovídající cívkou fáze B. Po přivedení dalšího impulsu na cívkou fáze C se rotor pootočí o stejný úhel ve stejném směru tak, že póly 3, 1 budou pod póly s cívkou fáze C. Při sledu impulsů A, B, C, A, B, se krokový motor otáčí ve směru hodinových ručiček. V případě Obr. 7.1 se rotor pootočí po každém impulsu o  $30^\circ$ .



Obr. 7.1: Princip konstrukčního uspořádání krokového motoru s permanentním magnetem[15]

Skutečné krokové motory mají krok obecně kolem  $1,8^\circ$ . Toho je dosaženo pomocí 50 zubů na rotoru a osmipólového statoru. [15]

### Krokový motor s aktivním rotorem

Jako krokové motory s aktivním rotorem označujeme motory, jenž mají rotor tvořen permanentními magnety. Póly rotoru jsou tvořeny různým uspořádáním permanentních magnetů v rotoru. Princip pohybu je založen na působení magnetických sil.

Jejich výhodou oproti motorům s pasivním rotorem je to, že mají větší krouticí moment. Motory s aktivním rotorem také vytváří tzv. klidový moment, i když motor není napájen. Klidový moment je vytvářen permanentními magnety a zvyšuje sílu, která je zapotřebí pro pootočení rotoru ve chvíli, kdy motor není napájen.

Obecně má tento typ krokových motorů větší velikost kroků. Obvyklé velikosti kroku jsou ve stupních až v desítkách stupňů. [20]

### Krokový motor s pasivním rotorem

Krokové motory s pasivním rotorem jsou označovány jako reluktanční či reakční motory. Rotor i stator motoru jsou ve většině případů složeny z ocelových plechů. Plechy rotoru tvoří pólové nástavce. Stator má tři až pětifázové buzení. Fáze statoru je tvořena nejčastěji dvěma protilehlými pólovými nástavci zapojenými do série. Princip pohybu je založen na změně reluktance (magnetického odporu).

Krokové motory s pasivním rotorem mají relativně malou velikost kroku. Obvyklé velikosti jsou od desetin stupně po jednotky stupňů. [20]

## Hybridní krokový motor

Hybridní krokový motor je kombinací krokových motorů s aktivním a pasivním rotorem. Rotor je zde tvořen permanentním magnetem kruhového tvaru nasunutým na ose z nemagnetického materiálu. Na pólech magnetu jsou nasazeny rotorové nástavce z měkkého železa, které na sobě mají drážky (zuby). Rotorové nástavce musí být nasazeny tak, aby drážky jednoho rotorového nástavce byly proti zubům druhého. [20]

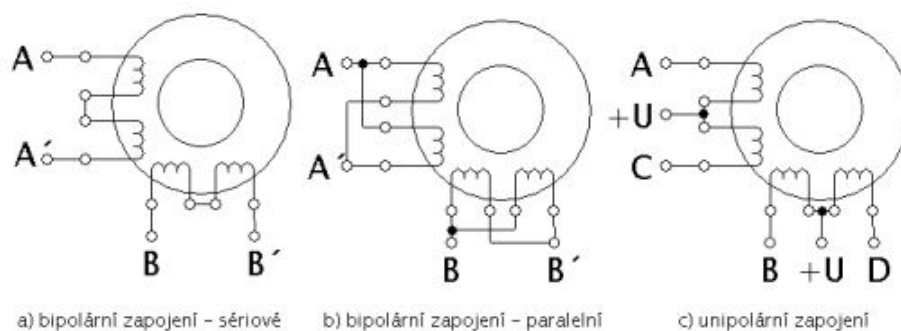
## Zapojení krokových motorů

Vyrábí se dva typy vynutí: Bipolární a Unipolární.

Bipolární motory jsou konstruovány stejně jako unipolární, rozdíl je pouze v jednodušším zapojení. Motor je tedy jednodušší, ale je potřeba mít složitější řízení motoru. Je třeba použít plného H-můstku na jednu fázi. Ten umožňuje, aby byla polarita proudu řízena na každém vinutí nezávisle. [20]

Při bipolárním zapojení máme možnost zapojit fáze sériově nebo paralelně. Při sériovém zapojení je výsledný odpor i indukčnost vinutí čtyřnásobná proti paralelnímu zapojení. Toto se projeví tím, že velikost momentu je vyšší v oblastech nižších krokovacích frekvencí momentové charakteristiky. Paralelní zapojení je vhodné použít pro oblast vyšších krokovacích frekvencí. [20]

Unipolární vinutí se vyskytuje zpravidla s vyvedeným středem, pro jeho buzení stačí 1 tranzistor na část vinutí jedné fáze. [20]



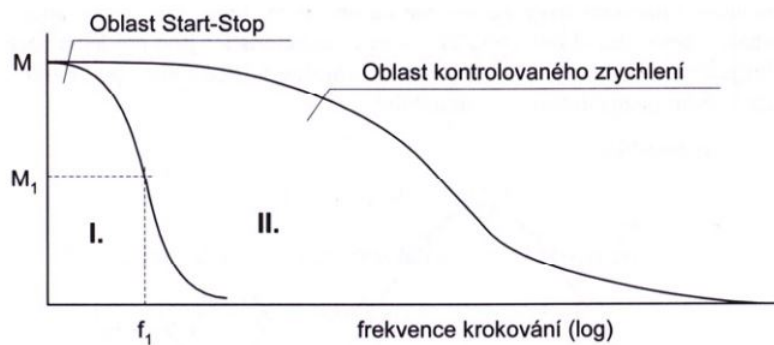
Obr. 7.2: Možnosti zapojení krokových motorů [20]

## Momentová charakteristika krokového motoru

Momentová charakteristika krokového motoru znázorňuje závislost momentu na krokovací frekvenci (otáčkách motoru). Tato momentová charakteristika je rozdělena na dvě oblasti. [18]

Oblast I, takzvaný start-stop nebo také rozběhová oblast. Je to oblast, kde lze krokový motor dostat z klidového stavu do otáček bez ztráty kroku. Při zatěžovacím momentu  $M_1$  můžeme ihned přivést řídicí kmitočet  $f_1$ . [18]

Oblast II, oblast kontrolovaného zrychlení. Oblast, do které se dostaneme plynulým zvyšováním řídicí frekvence. [18]



Obr. 7.3: Momentová charakteristika krokového motoru, [18]

## 8 PARAMETRY TISKÁRNY

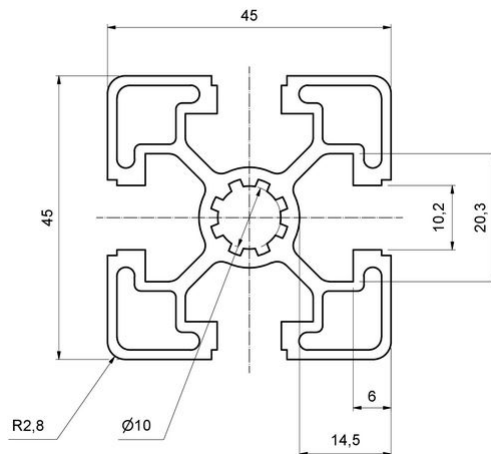
- Výrobní prostor dle konstrukce: 300 x 400 x 400 mm (x, y, z).
- Pohon 3 krokové motory.
- Tisková hlava pro 3 extrudéry.
- Maximální zatížení v ose Z 20 kg.
- Projektovaná rychlost tisku 100mm/s.
- Maximální rychlost rychloposuvu 300 mm/s.

Doplňkové funkce:

- Ovládací panel s LCD displejem a rotačním enkodérem pro ovládání.
- RGB led na čelním panelu pro názornou signalizaci stavu tiskárny.
- LED signalizace chodu topných elementů.
- „Run out“ senzor filamentu.

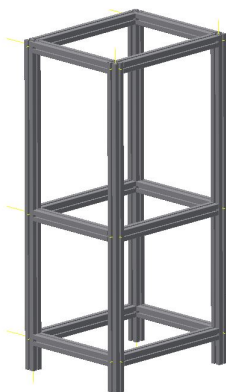
## 9 RÁM ZAŘÍZENÍ

Rám zařízení byl jedním z komponent, které byly od začátku dané. Jedná se o hliníkový rám od firmy Alutec K&K s.r.o. Rám je složen z jednotlivých profilů 45x45 mm. Tyto profily mají dobrou pevnost pro naši aplikaci. Další výhodou těchto profilů je možnost vložení kluzných matek do těchto drážek. Takto budou řešena většina uchycení k rámu. Samotný profil je možno vidět na obr. 16.



Obr. 9.1: Průřez tyče rámu [16]

Celý rám je přesně složen, tudíž by neměl být problém s geometrií rámu. Rám má rozměry 600 x 490 x 1300 mm (X, Y, Z).

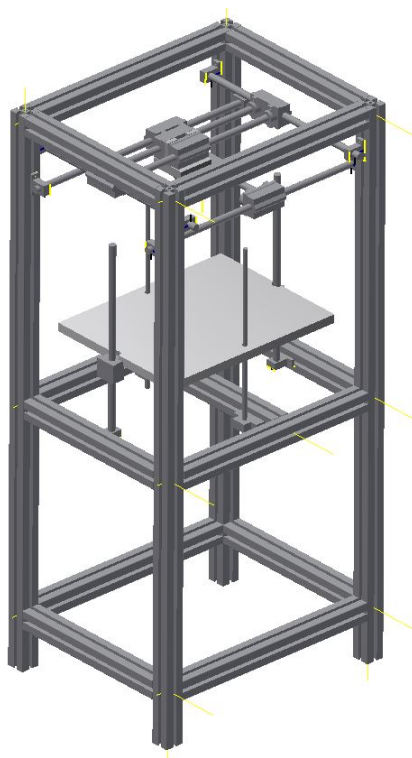


Obr. 9.2: Celkový pohled na rám

## 10 NÁVRH OS

Návrh pojezdů pro tiskovou hlavu byl navržen tak, aby dosahoval největší tiskové plochy v rámci nosné konstrukce. Tisková plocha je 300 x 400 x 400 mm (x, y, z). Při návrhu byl také kladen důraz na to, aby bylo vše kompaktně uloženo uvnitř nosného rámu. Pro možnost vytvoření vnějšího krytu tiskárny. Kryt by fungoval jako tepelná izolace a zároveň ochraňoval vnitřní komponenty. Pro uchycení by bylo využito drážek v nosném rámu.

Výběr komponentů byl proveden zároveň s tvorbou tohoto návrhu. Jednotlivé součástky byly využity z elektronického obchodu *cncshop.cz*. Mají na svých stránkách dostupnou technickou dokumentaci ke všem využitým dílům. Pro zrychlení práce nejsou všechny prvky vymodelovány se stoprocentní přesností.



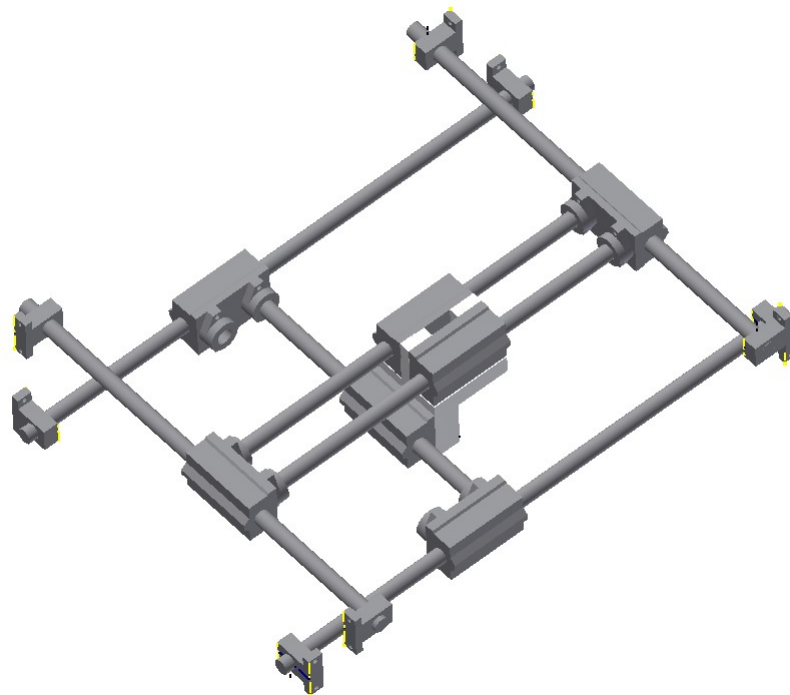
Obr. 10.1: Návrh v CAD

### 10.0.1 Návrh os X,Y

Tiskárna bude pracovat v Kartézském souřadném systému. Tudíž se tisková hlava bude pohybovat v osách X, Y a nosná deska v ose Z. V rovině XY se využívá paralelní kinematiky po vzoru komerční tiskárny Ultimaker. Z důvodu použití kartézské



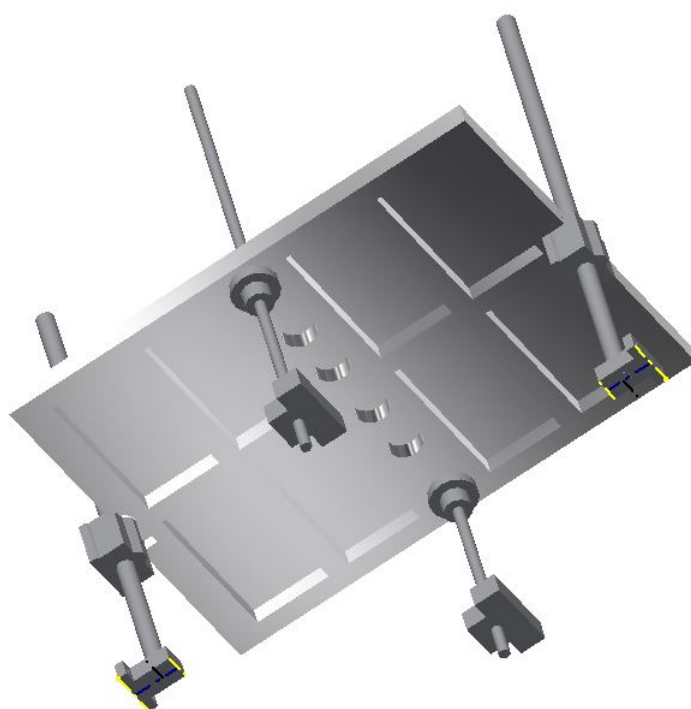
kinematiky vychází, že budeme potřebovat minimálně 3 krokové motory. Pro pohon os X a Y je použit řemenový poháněcí mechanismus. Zde bylo komplikované vymyslet uložení motorů, aby nevyčnívali z konstrukce a zároveň byly izolovány od tepelné komory. Proto je motor uložen do středu strany nosné konstrukce, tudíž lze kolem něj v krytu 3D vytvořit profil ve, kterém se motor umístí. Profil bude vhodné vyplnit tepelným izolantem. Dále zde bylo potřeba vyřešit, aby byly poháněny oba pojezdy v jedné ose kvůli velikosti tiskárny (mohlo by dojít ke zkrutu, a tak vytvoření zbytečných ztrát). Což řešení s motory uprostřed strany také splňuje. Napínání řemenů, jež spojují pojezdy a hřídel motoru, je řešeno jednoduše. Řemen je spojen na pojezdu a zde lze napnout.



Obr. 10.2: Detail na osy X,Y

### 10.0.2 Návrh osy Z

Pohyb v ose Z je vyřešen pomocí posunu tiskové podložky. Celý mechanismus váží okolo 6 kg a nadimenzován je na 20 kg. Pro pohon osy Z je využita dvojice trapézových šroubů. Ty díky svému převodovému poměru redukují potřebný přídržný moment. Dále je deska přichycena dvojicí linearsetů. Ty napomáhají udržovat, aby byl pohyb pouze v ose Z.



Obr. 10.3: Detail na osu Z

## 11 DIMENZOVÁNÍ MOTORŮ

Z momentové charakteristiky 7.2. můžeme vidět, že moment s rostoucími otáčkami motoru rychle klesá. V případě, že by zatěžovací dynamický moment byl větší než okamžitý moment motoru, došlo by ke ztrátě kroku motoru. To je v našem případě nepřijatelné. Tudíž při samotném návrhu musíme pracovat s momentovou charakteristikou daného motoru, ze které si určíme maximální rychlost otáčení. Tím si zároveň volíme moment, který je v daném pracovním bodě motor schopen vyvinout.

Při návrhu potřebného momentu motoru se vychází z pohybové rovnice:

$$M_{mot} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_s \quad (11.1)$$

$M_{mot}$  - potřebný moment motoru [Nm];  $J$  - moment setrvačnosti poháněných hmot včetně rotoru [ $kg \cdot m^2$ ];  $\frac{d\omega}{dt} = \epsilon$  - úhlové zrychlení [ $rad \cdot s^{-2}$ ];  $M_s$  - statický zatěžovací moment [Nm]

Pro CNC obráběcí stroje se běžně volí lineární zrychlení  $a = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Lineární zrychlení lze přepočítat na úhlové zrychlení ze znalosti poloměru osy otáčení podle vztahu:

$$\epsilon = \frac{a}{r} = \frac{10}{0.01} = 1000 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (11.2)$$

$r$  - poloměr poháněcího ozubeného kola [m],  $a$  - lineární zrychlení [ $m \cdot \text{s}^{-2}$ ]

### 11.1 Osa X a Y

Použita bude tisková hlava s přímým pohonem. To znamená, že cold end i hot end budou součástí tiskové hlavy. To znamená větší hmotnost tiskové hlavy. Počítáme s hmotností 2 kg. Dále se musí připočíst další mechanické díly. Proto návrh bude proveden pro 4 kg hmotnost osy X a pro osu Y.

Převést hmotnost osy na rotační moment setrvačnosti z pohledu motoru lze podle vztahu:

$$J_o = m \cdot r^2 = 4 \cdot 0,01^2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (11.3)$$

$J_o$  - redukovaný moment setrvačnosti lineárně se pohybujících hmot [ $kg \cdot m^2$ ]

Celkový moment setrvačnosti se skládá z momentu setrvačnosti osy a vlastního momentu setrvačnosti rotoru motoru:

$$J_{celk} = J_o + J_{mot} = 4 \cdot 10^{-4} + 0,275 \cdot 10^{-4} = 4,275 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (11.4)$$

Požadovaný dynamický moment motoru:

$$M_{mot} = J_{celk} \cdot \frac{d\omega}{dt} = 1000 \cdot 4,275 \cdot 10^{-4} = 0,428 Nm \quad (11.5)$$

Maximální projektová rychlost lineárního pohybu je  $v_{\max} = 314$  mm/s. Tato rychlost odpovídá při zvolené konfiguraci pohonného ústrojí 1000 pps. Při této rychlosti má motor SX24-2341D moment 2 Nm. To je více než čtyřikrát vypočtený dynamický moment. V úvahách však nebyl zahrnut fakt, že motor bude napájen polovičním napětím, což na 1000 pps přinese určitě nějaký pokles momentu. Dále zde byl zanedbán statický moment způsobený třením. Ve výsledku tudíž bude zajištěna rezerva pro budoucí experimentování s mikrokrokováním krovových motorů. [19]

## 11.2 Osa Z

Na osu Z nejsou kladeny nároky na dynamiku, jelikož se posouvá pouze při vytištění celé vrstvy. Pohon osy Z je navržen na statický moment potřebný k udržení výrobku ve stabilní poloze. Určili jsme maximální zatížení v ose Z na 20 kg. Což představuje jisté omezení při procentuálním vyplnění výrobku. Při výpočtu statického zatěžovacího momentu se dá vyjít ze zákona zachování výkonu: [19]

$$P = M \cdot \omega = F \cdot v \quad (11.6)$$

$$M = \frac{F \cdot v}{\omega} = \frac{m \cdot g \cdot v}{\omega} = \frac{20 \cdot 9,81 \cdot 0,314}{2\pi \cdot 5} = 1,96 Nm \quad (11.7)$$

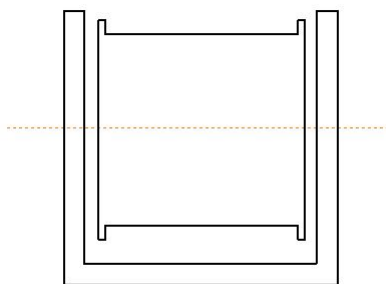
$M$  – točivý moment rotačního pohybu [Nm];  $\omega$  – úhlová rychlost [ $rad \cdot s^{-1}$ ];  $F$  – lineární síla [N];  $g$  – tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ];  $v$  – rychlost lineárního pohybu [ $m \cdot s^{-1}$ ]

## 12 NÁVRH ŘEMENIC

Řemenice jsou klíčovým komponentem v distribuci kinematické energie pro pohyb os X, Y. Proto je důležité aby, řemen seděl na řemenici, neprotahoval se a nepřeskakoval. Tudíž je třeba vybrat ten správný řemen a dobře jej napnout. Při nákupu součástek bylo zakoupeno patnáct řemenic HTD 18 5M 15. Tyto řemenice nemají předvrtaný otvor pro hřídel, tudíž bylo potřeba přijít s adekvátním uložením.

### 12.1 První návrh

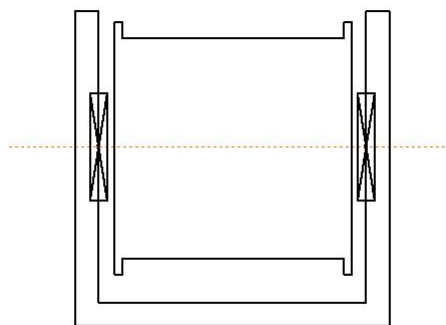
První návrh spočíval v tom, že by se pro uchycení využilo hliníkového U profilu. Ten by měl rozměr 30x30x3. Jako hřídel by se využilo šroubu, který by zpevnil celou konstrukci. Tento návrh byl zavrhnut z důvodu možných ztrát vzniklých třením řemenice o U profil.



Obr. 12.1: První návrh řemenice

### 12.2 Druhý návrh

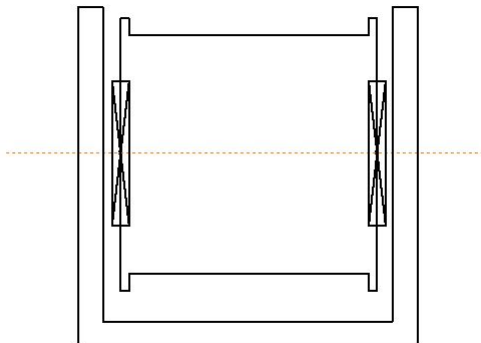
V tomto případě bylo opět využito U profilu, tentokrát velikosti 40x40x4. Ložiska by byly uloženy v samotném U profilu. To by řešilo problém minulého návrhu, ale nakonec byl zamítnut pro složitost výroby a cenovou nákladnost. Pro usazení ložisek by musely být otvory pro ložiska v přesnosti h6. Použitá ložiska v této aplikaci byla atypická a to přineslo zvýšené náklady.



Obr. 12.2: Druhý návrh řemenice, proškrtnutý obdélník vyznačuje místo ložisek

### 12.3 Finální návrh

Finální návrh vznikl při konzultaci s panem Němcem ve školní dílně. Základní myšlenka U profilu byla zachována. Ložiska se uloží do stran samotné řemenice. To vyřeší problémy návrhu číslo jedna. Použitá ložiska jsou 625 ZKL 5-16-5 s cenou 13 Kč za kus. To řeší problémy návrhu číslo dva.



Obr. 12.3: Finální návrh řemenice, proškrtnutý obdélník vyznačuje místo ložisek

## 13 NÁVRH A REALIZACE NOSNÉ DESKY

O nosné desce, co se týče obecných pojmů, jsme se již vyjádřili v kapitole 4.1.1. Zde je popsáno samotné řešení pro tuto práci.

### 13.1 Návrh nosné desky

#### 13.1.1 První návrh

Prvotní návrh spočíval ve využití hliníkových profilů, ze kterých se skládá samotný rám tiskárny, ten by tvořil obdélníkový rám. Do tohoto rámu by pak mohlo být vloženo vyhřívání včetně tepelné izolace. Na horní stranu tohoto rámu by se následně uchytila tisková podložka. Po konzultaci s vedoucím této práce bylo od tohoto návrhu odstoupeno z důvodu možných nepřesností tohoto rámu.

#### 13.1.2 Finální návrh

Po konzultaci jsme došli k závěru, že ideální bude pořídit hliníkový blok. Ten bude následně opracován do požadovaného stavu. Samotná deska má rozměr 450x350x20 mm. Slitina byla vybrána AlMg4,5Mn0,7. Kvůli vlastnostem vhodným pro obrábění a nízké hmotnosti. Důležitý faktorem byla i cena.

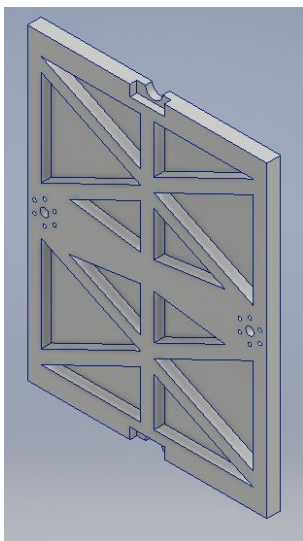
Deska je posunována dvěma trapézovými šrouby. Na stranách je přichycena linearity, aby bylo dosaženo větší přesnosti při pohybu.

Při těchto rozměrech tato deska váží pod 10kg. To je stále hodně i přes to, že osa Z na zvedání je dimenzována na 20kg. Je zbytečné zvedat takovou masu materiálu když to není třeba. Proto byly nakonec vypracovány návrhy na odlehčení. Cílem bylo dostat se k 5 kg.

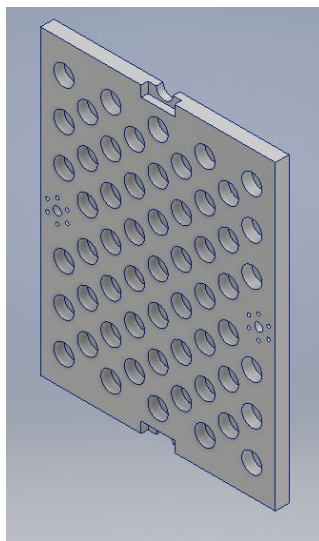
První návrh je tím nejvhodnějším. Velké odlehčení při zachování pevnosti desky. Hmotnost je zde z 9 na 5,5 kg. Tudíž celkové odlehčení 3,5 kg. Samotné odlehčení je tvořeno odfrézováním trojúhelníkových segmentů. Tento návrh byl nadále konzultován s panem Němcem, který to obrábí. Výsledkem této konzultace bylo: Tento návrh je sice pěkný, avšak v našich podmínkách nerealizovatelný. Proto s jeho spoluprací byly navrženy další návrhy.

Další návrh spočíval v odvrtávání. Tento způsob je časově i technologicky nejjednodušší. Limitem zde je maximální velikost vrtáku, v našich podmínkách je 30mm. Celkem bylo neprojektováno 57 děr. Celkové odlehčení zde bylo z 9 na 7kg. Tudíž celkové odlehčení 2 kg. Což je pro nás nedostatečné odlehčení.

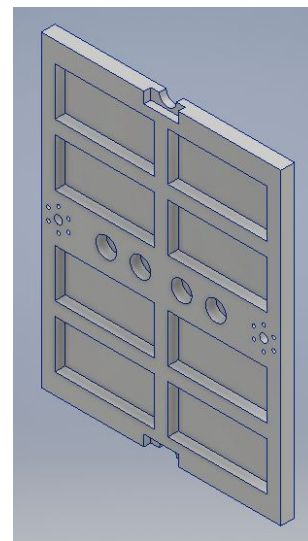
Z těchto návrhů vznikl kompromis na finální návrh. Kombinací odfrézování obdélníkových segmentů a odvrtávání materiálu. Takto bylo docíleno odlehčení z 9 na 5,2 kg. Což je největší odlehčení a je to i realizovatelné v našich podmínkách.



Obr. 13.1: Návrh nosné desky č. 1



Obr. 13.2: Návrh nosné desky č. 2



Obr. 13.3: Návrh nosné desky č. 3

## 13.2 Řešení nosné desky

Samotné řešení této desky spočívalo v:

- Nákup materiálu
- Opracování
- Instalace desky

Na nákup materiálu byly poptány celkem 3 firmy pro zaručení lepší ceny. Nakonec bylo zakoupeno u firmy *Ehlinnik.cz*. Opracování materiálu bylo svěřeno panu Němcovi, dle technický výkresů. Samotná instalace proběhla přiroubováním do vymezené polohy.



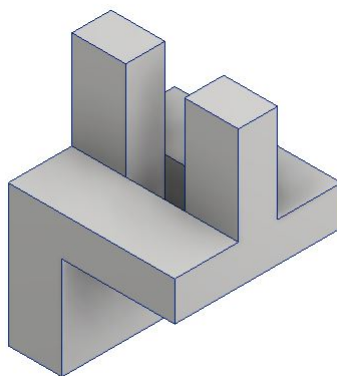
## 14 NÁVRH A REALIZACE TISKOVÉ HLAVY

Teorie tiskové hlavy je probrána v kapitole 4.1.2, zde je popsána konkrétní tisková hlava vytvořena pro tuto konkrétní 3D tiskárnu.

### 14.1 Návrh tiskové hlavy

Při návrhu této tiskové hlavy byl kladen důraz na její rozměr, pevnost a univerzálnost. Volba materiálu proběhla podobně jako výběr materiálu pro nosnou desku. Materiál byl vybrán slitina AlMg4,5Mn0,7, pro nízkou hmotnost, dobrou obrobitelnost a přijatelné ceně. Objednán byl kvádr o rozměrech 90x90x170 mm.

Z tohoto kvádru bude vytvořen, skelet jež lze vidět na obrázku 14.1. Tento tvar zapadá mezi linearsety, které zajišťují pohyb po pojezdových tyčích. Ve středu je vytvořen otvor pro provedení kabeláže k extrudéru. Extrudér je uchycen na spodní stěně tohoto skeletu. Zde jsou závitky pro uchycení různých extrudérů.



Obr. 14.1: Návrh skeletu tiskové hlavy

Při Výběru extrudéru a hot endu bylo vybráno z již nakoupených dílů z předešlé diplomové práce. Jedná se o extruder Bulldog v kombinaci s E3D V6 hot endem. Jedná se o extruder s integrovaným pohonem tiskového materiálu.

### 14.2 Realizace tiskové hlavy

Samotné řešení této desky spočívalo v:

- Nákup materiálu
- Opracování



Obr. 14.2: Zvolený extrudér Bulldog a E3D V6 hot end [19]

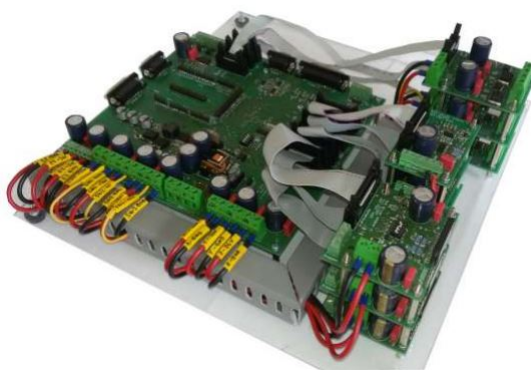
- Instalace

Nákup materiálu proběhl zároveň s nákupem materiálu na nosnou desku. Opracování měl opět na starost pan Němec. Instalace proběhla přišroubováním do žádané polohy.

## 15 SCHÉMA ZAPOJENÍ

V rámci zadání této bakalářské práce bylo také vytvořit elektrické schéma zapojení této 3D tiskárny. Samotné schéma bylo nakresleno v programu ProfiCAD. Tento program disponuje relativně velkou databází již předkreslených komponent. Schémata jsou rozdělena po skupinách na několik listů. (analogové vstupy, motory, ...) Tyto výkresy jsou přiloženy v příloze této práce.

Tato bakalářská práce navazuje na diplomovou práci jejíž tématem byl návrh řídicí elektroniky pro 3D tiskárnu. Toto schéma zapojení respektuje již vytvořený název svorkovnic, pro jednodušší orientaci.



Obr. 15.1: Řídicí elektronika [19]

### 15.0.1 Dimenzování kabelů

V rámci samotného zapojení byly navrženy i průměry a typy kabelů. Na izolaci kabelů je vybrán zesíťovaný polyetylén pro jeho nejvyšší dovolenou provozní teplotu  $90^{\circ}\text{C}$ . Pro motory a snímače poloh jsou vybrány stíněné kabely, aby bylo předejito vzniku možných chyb z důvodu elektrické interference.

Průměry samotných kabelů jsou dimenzovány tak, aby vyhovovaly řídicí elektronice. Tudíž je možné nahradit stávající komponenty za jiné, které budou vyhovovat podmínkám řídicí elektroniky.

## 16 ROZPOČET

Tabulka 15.1 zobrazuje finanční náklady na tento projekt. Dle konečné cifry 17 689 Kč můžeme zhodnotit tento projekt. Dle mého názoru v době, kdy tento projekt započal, tedy roku 2015, byl tento projekt finančně výhodný. Od té doby se 3D tisk stal dostupnějším. Jak z pohledu uživatelské příjemnosti, tak finanční. Shledávám tento počín ve stavění tiskárny jako nevýhodný. Výhoda této tiskárny je v tom, že je předimenzována její pevnost. Toho lze využít uchycením menší frézky a vytvořením tak tří osého CNC stroje.

Tab. 16.1: Náklady na 3D tiskárnu

Součást	Počet	Cena za kus/m (kč)	Cena celkem (kč)
Trapézový šroub	2	190 Kč	380
Vodící tyče	4,5 m	470	2115
SMAL dvojité uzavřený linearset	8	490	3920
SMA uzavřený linearset	3	340	1020
SK uchycení vodících tyčí	15	140	2100
SHF uchycení vodících tyčí	10	140	1400
Ozubené řemenice HTD 5M 15	15	62	930
Řemen HTD 5M 15	2	185	370
TRM-BRFL trapézová přírubová matice bronz	2	640	1280
EF ložisková jednotka, volné uchycení	4	665	2620
AlMg4,5Mn0,7 20x350x450	1	1080	1080
AlMg4,5Mn0,7 90x90x170	1	474	474
Hliníkový U profil	1 m	120	120
Hliníkový L profil	2 m	75	150
Ložiska 625 2Z ZVL	12	13	156
Celkem			18 115

## 17 PLÁNY DO BUDOUCNA

Dalším krokem ve stavbě této 3D tiskárny je objednání a uložení motorů. Pozice pro motory jsou již dané z návrhu této práce. Vybrané motory jsou *SX24-2341D*.

Dále je třeba osadit nosnou desku tepelnou izolací, výhřevnými deskami a tiskovou podložkou. Pro izolaci bych doporučil korkovou desku. Výhřevné desky jsou již vybrány a nakoupeny. Jedná se o desky *PBC Heatbed MK2B DUAL POWER*. Zapojeny budou na 24V.

V rámci vylepšení samotné práce s uložení pojezdů, již byly vyměněny šrouby s šesti hranou hlavou za šrouby s imbusovou hlavou.

Zateplení komory lze vyřešit obložením nosné konstrukce z vnější strany. Proto byla snaha vše umístit tak, aby komponenty nepřesahovaly vnější okraj nosného rámu.

Pro řídicí elektroniku je místo pod nosnou deskou, kde se přidá další nosné patro.

Přidání nožiček do závitů na spodní straně nosného rámu. Lze našroubovat M8 nohy. Pomocí těch půjde tiskárna vyrovnat, tak aby tisková plocha byla ve vodorovné poloze.

## 18 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala návrhem a konstrukcí 3D tiskárny. Na začátku byla provedena rešerše na téma 3D tisk pro vytvoření základní informací k danému tématu. Jsou zde popsány nejčastěji využívané technologie 3D tisku. Technologie FDM bude využita v konstruované tiskárně.

V rámci teorie byla prostudována i problematika pohonů CNC strojů s hlavním důrazem na krokové motory. Ty pak v praktické části jsou dimenzovány. Vybraný motor je SX24-2341D s momentem 2Nm při zvolené konfiguraci pohonného ústrojí 1000 pps. To je více než čtyřikrát vypočtený dynamický moment. Nepočítali jsme však se statickým momentem způsobeným třením. Ve výsledku tudíž bude zajištěna rezerva pro budoucí experimentování s mikrokrokováním krokových motorů. Osa Z je nadimenzována na 20 kg, což nám zaručuje vytvářet výrobky do 10 kg.

Dále již následuje samotná konstrukce 3D tiskárny. Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor 2018. Tento model byl využit pro fyzické zkompletování. V tomto návrhu se řeší jak využít samotný rám, který byl jedním ze vstupních komponent. Většina komponent byla vybrána z obchodu *CNCshop.cz*, pro zajištění možnosti nákupu náhradních dílů. Kinematika byla vybrána kartézská, v rovině XY se využívá paralelní kinematiky po vzoru komerční tiskárny *Ultimaker*. Osa Z je vedena dvojicí trapézových šroubů.

V práci se řeší návrhy a realizace řemenic, nosné desky a tiskové hlavy. Tyto komponenty byly konzultovány jak s vedoucím práce, tak s panem Němcem, který se podílel na výrobě.

V rámci práce je vypracováno i schéma zapojení této 3D tiskárny. Schéma koresponduje s řídicí deskou, která byla navržena vedoucím práce v rámci diplomové práce. Samotné kabely byly nadimenzovány, aby vyhovovali řídicí desce. Tomuto se věnuje kapitola 17.

Vyřešena byla zatím jen kinematika, avšak nápady na vytvoření tepelné komory již existují. Dále je třeba vymyslet uložení řídicí elektroniky, uložení potřebných kabelů a drátů a ovládacích prvků.

# LITERATURA

- [1] MARQUARDT, Tahnee a Emmi ZHENG. History of 3D Printing. *The Lawrence University* [online]. , 1 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <https://blogs.lawrence.edu/makerspace/history/>
- [2] NOVAKOVA-MARCINCINOVA, Ludmila. *Application of Fused Deposition Modeling Technology in 3D Printing Rapid Prototyping Area* [online]. Faculty of Manuf. Tech. TUKE, 2012, , 3 [cit. 2017-12-28]. ISSN 1338-6549. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/7d6d/f5e54e7c1f8ea4a6447473003d5eeb4ffa1.pdf>
- [3] 3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE. ABCD 3D: *Nejlepší pro 3D tisk* [online]. 2016 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
- [4] Informace o technologiích 3D tisku. *Easycnc* [online]. 2013 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [5] DUDEK, P. *FDM 3D PRINTING TECHNOLOGY IN MANUFACTURING COMPOSITE ELEMENTS* [online]. 2013, , 4 [cit. 2018-01-01]. DOI: 10.2478/amm-2013-0186. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/amm.2013.58.issue-4/amm-2013-0186/amm-2013-0186.pdf>
- [6] A Comprehensive Introduction to 3D Printing Technology. *3D Printing for beginners* [online]. 2014 [cit. 2018-01-01]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/a-comprehensive-introduction-to-3d-printing-technology/>
- [7] Anatomy of a 3D Printer: How Does a 3D Printer Work? *Matterhackers* [online]. 2016 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/>
- [8] Best 3D Printer Extruder in 2018. *3D Printer Prices* [online]. 2018 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.3dprinterprices.net/best-3d-printer-extruder/>
- [9] 3D PRINTER FILAMENT COMPARISON GUIDE. *Matter Hackers* [online]. 2018 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>
- [10] CANESSA, Enrique (ed.), Carlo FONDA (ed.) a Marco ZENNARO (ed.). *LOW-COST 3D PRINTING FOR SCIENCE, EDUCATION and SUSTAINABLE DEVELOPMENT*. 1. Terst Itálie: ICTP—The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013. ISBN 92-95003-48-9.

- [11] 3D Printers Explained: Delta, Cartesian, Polar, Scara. *All3DP* [online]. 2015 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://all3dp.com/know-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/>
- [12] Polar 3D printer. *3D printing database* [online]. <http://3dprintingdatabase.org> [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://3dprintingdatabase.org/en/3dprinter/polar-3d-printer>
- [13] Scara Arm 3D Printer. *Robotdigg* [online]. [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://www.robotdigg.com/product/929/Scara-Arm-3D-Printer>
- [14] MAREK, Jiří. *emphKonstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014, 684 stran. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [15] Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., ed. *Elektrické stroje*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [16] *Alutec KK* [online]. Čelákovice [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://katalog.aluteckk.cz/produkt/profil-45x45-lehky-164545l/>
- [17] Smal dvojitý uzavřený linearset. In: *CNCshop.cz* [online]. Štěplovec [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://cncshop.cz/smal-dvojity-uzavreny-linearset>
- [18] NOVÁK, P.: *emphMobilní roboty - pohony, senzory, řízení*. BEN, Praha, 2005, 256 s., ISBN 80-7300-141-1
- [19] CTIBOR, Jiří. *3D TISKÁRNA*. Brno, 2016. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [20] *Druhy krokových motorů: Rozdělení krokových motorů* [online]. Plzeň: Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni, 2017 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.kvd.zcu.cz/cz/materialy/POS/HTML/57/default.htm>



## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

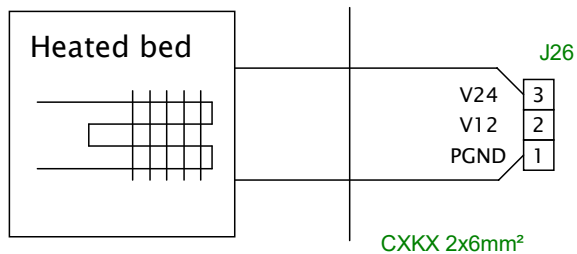
AM	Additive manufacturing
FFF	Fused Fabricment Fabrication
STL	Stereolithography
RP	Rapid Prototyping
CNC	Computer Numerical Control
PJP	Multi Jet Printing
SLS	Selective Laser Sintering
DMP	Direct Metal Printing
LOM	Laminated Object Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
ABS	Akrylonitril butadien styren
PLA	Polylactic acid
PET	Polyethylene terephthalate
PP	PolyPropylene
Scara	The selective compliance assembly robotic arm
$M_{mot}$	Moment motoru [Nm]
$\epsilon$	úhlové zrychlení [ $rad \cdot s^{-2}$ ]
$M_s$	Statický zatěžovací moment [Nm]
a	Lineární zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$J_o$	Redukovaný moment setrvačnosti lineárně se pohybujících hmot [ $kg \cdot m^2$ ]

# SEZNAM PŘÍLOH

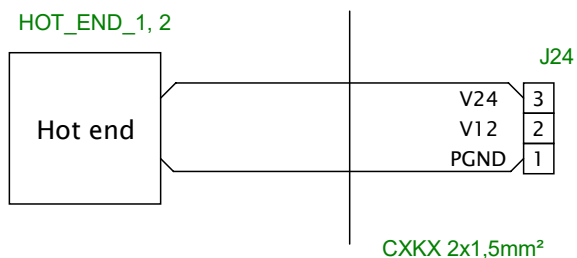
A Příloha 1 - Vyhřívací okruhy	58
B Příloha 2 - Analogové vstupy	60
C Příloha 3 - Digitální vstupy	62
D Příloha 4 - Zapojení ventilátorů, RGB, Stop tlačítka	64
E Příloha 5 - Zapojení motorů	66
F Příloha 6 - Fotodokumentace	68

## A PŘÍLOHA 1 - VYHŘÍVACÍ OKRUHY

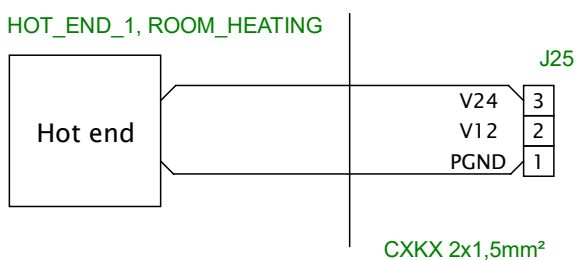
HEATED\_BED\_1, 2




HOT\_END\_1, 2

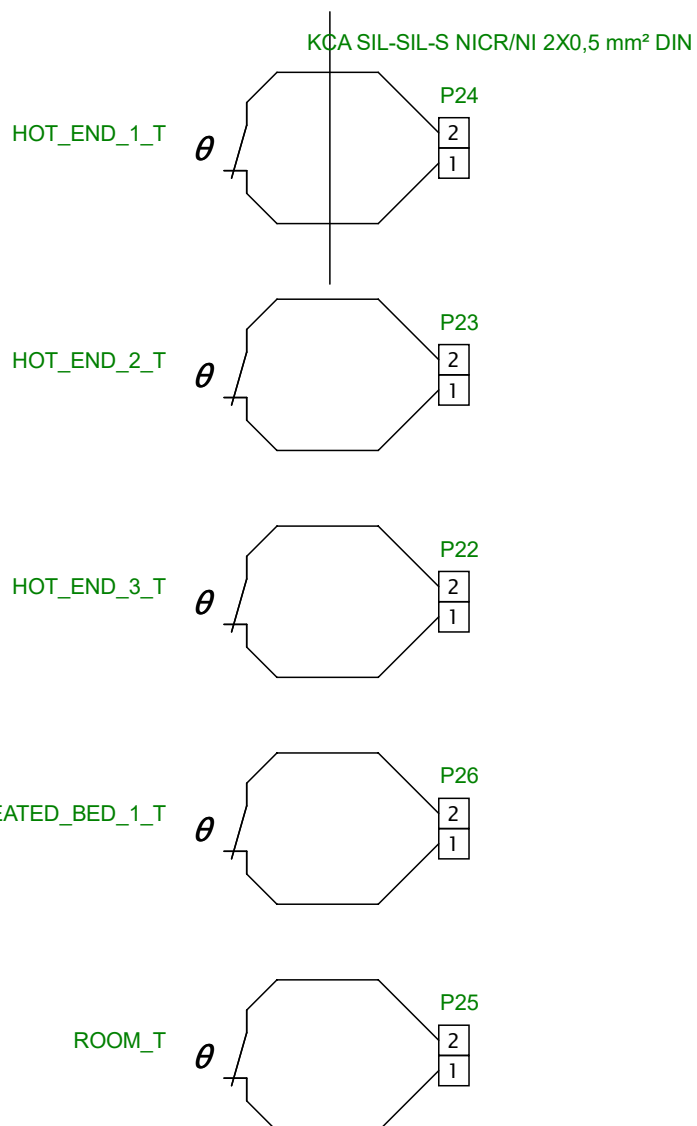


HOT\_END\_1, ROOM\_HEATING




Oddělení	Technický referent	Kreslil Hanzlíček Martin	Přezkoušel	
		Druh dokumentu	Status dokumentu	Změna
		Název, doplňující název Výhřevací okruhy	Č. dokumentu 1	Měřítko
			Datum vydání 29.04.2019	Jazyk CZ
			List 1 / 1	1/1

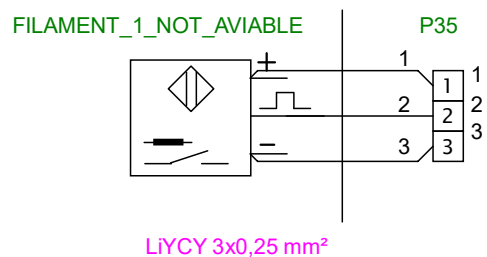
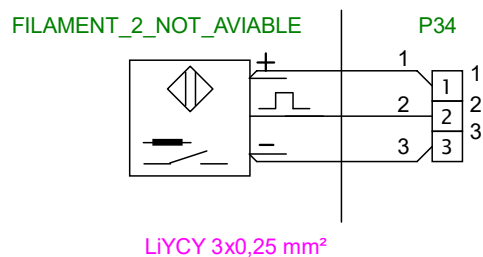
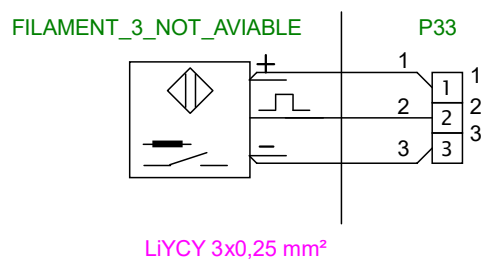
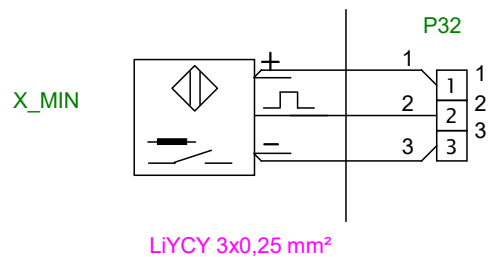
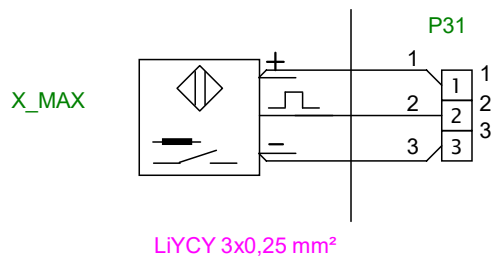
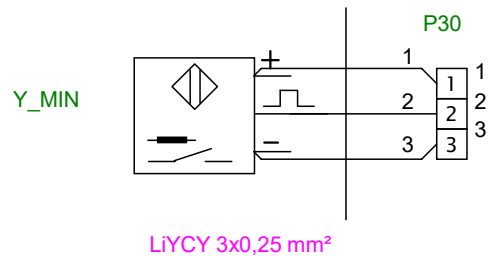
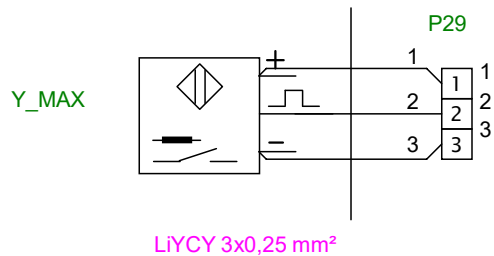
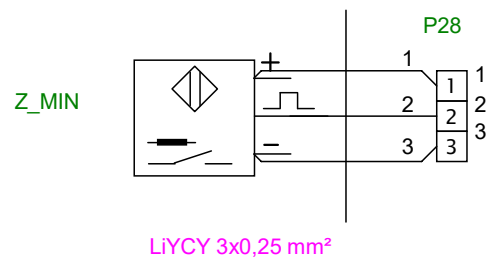
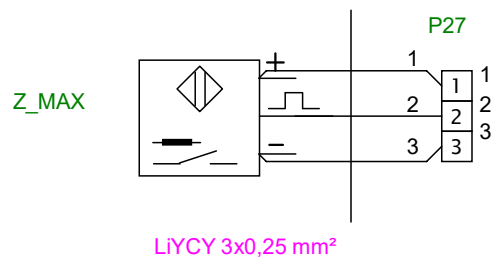
## **B PŘÍLOHA 2 - ANALOGOVÉ VSTUPY**




KCA SIL-SIL-S NICR/NI 2X0,5 mm<sup>2</sup> DIN  
kabel je stejný pro všechna zapojení

Oddělení	Technický referent	Kreslil Hanzlíček Martin	Přezkoušel		
		Druh dokumentu	Status dokumentu	Změna	
		Název, doplňující název Analogové vstupy	Č. dokumentu 2	Měřítko	
			Datum vydání 29.04.2019	Jazyk CZ	List 1 / 1 1/1

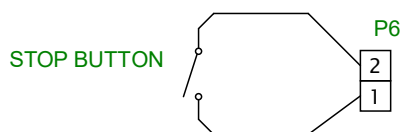
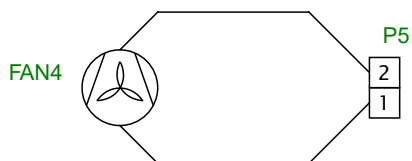
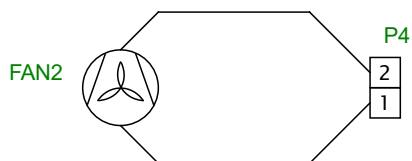
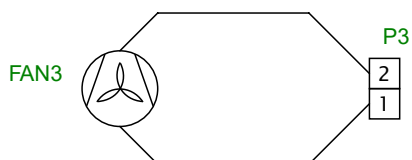
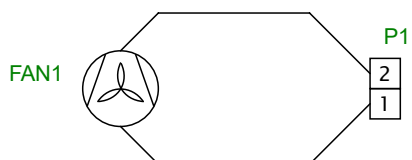
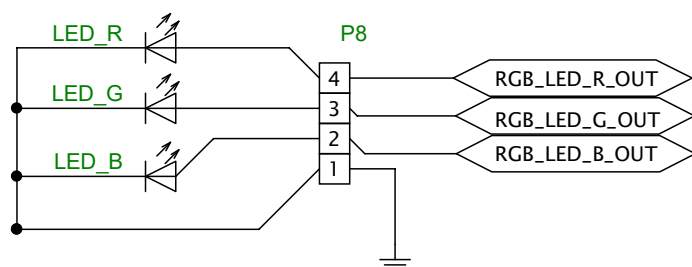
## **C PŘÍLOHA 3 - DIGITÁLNÍ VSTUPY**




Oddělení	Technický referent	Kreslil Hanzlíček Martin	Přezkoušel		
		Druh dokumentu	Status dokumentu	Změna	
		Název, doplňující název Digitální vstupy	Č. dokumentu 3	Měřítko	
			Datum vydání 29.04.2019	Jazyk CZ	List 1 / 1 1/1



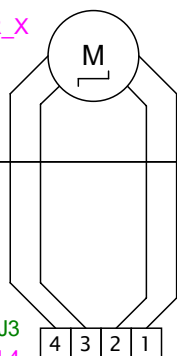
## **D PŘÍLOHA 4 - ZAPOJENÍ VENTILÁTORŮ, RGB, STOP TLAČÍTKA**



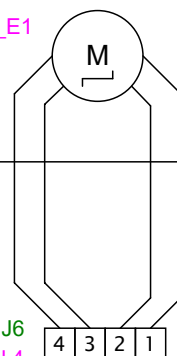
Oddělení	Technický referent	Kreslil Hanzlíček Martin	Přezkoušel		
		Druh dokumentu	Status dokumentu	Změna	
		Název, doplňující název Ventilátory, RGB, Stop	Č. dokumentu 4	Měřítko	
			Datum vydání 29.04.2019	Jazyk CZ	List 1 / 1 1/1

## **E PŘÍLOHA 5 - ZAPOJENÍ MOTORŮ**

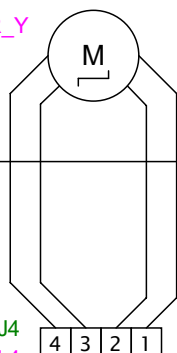
STEPPER\_DRIVER\_X

FD CLASSIC 810 CY 4G2,5 mm<sup>2</sup>J3  
Terminal 4

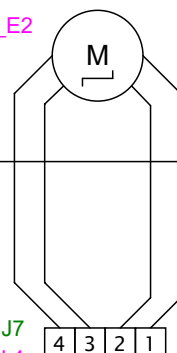
STEPPER\_DRIVER\_E1

FD CLASSIC 810 CY 4G2,5 mm<sup>2</sup>J6  
Terminal 4

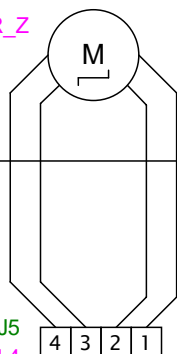
STEPPER\_DRIVER\_Y

FD CLASSIC 810 CY 4G2,5 mm<sup>2</sup>J4  
Terminal 4

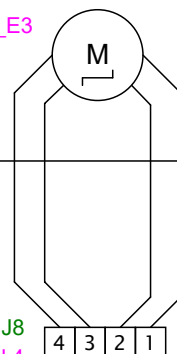
STEPPER\_DRIVER\_E2


FD CLASSIC 810 CY 4G2,5 mm<sup>2</sup>J7  
Terminal 4

STEPPER\_DRIVER\_Z

FD CLASSIC 810 CY 4G2,5 mm<sup>2</sup>J5  
Terminal 4

STEPPER\_DRIVER\_E3

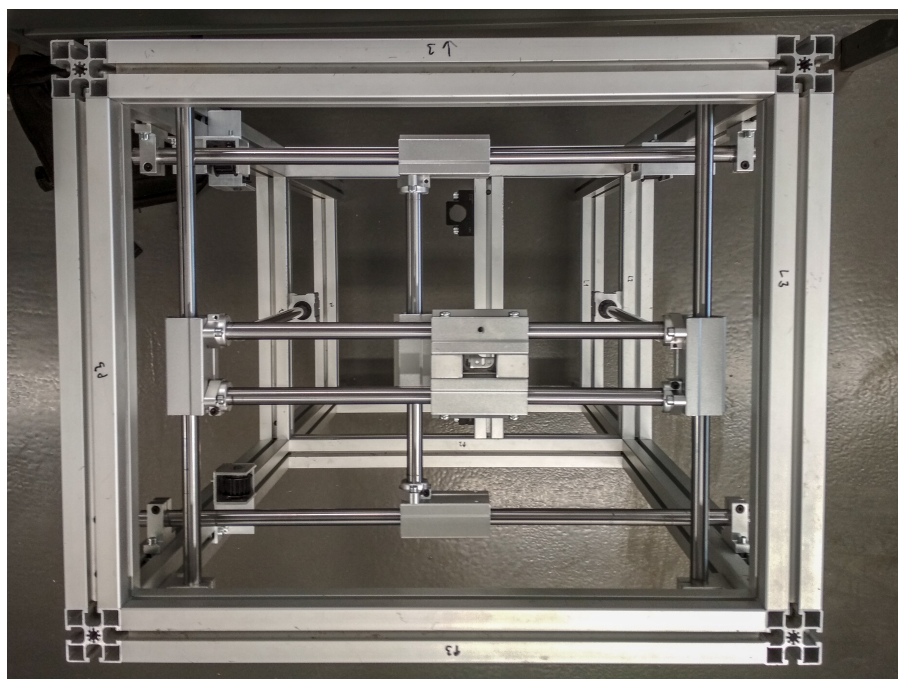
FD CLASSIC 810 CY 4G2,5 mm<sup>2</sup>J8  
Terminal 4

Oddělení	Technický referent	Kreslil Hanzlíček Martin	Přezkoušel	
		Druh dokumentu	Status dokumentu	Změna
		Název, doplňující název Zapojení motorů	Č. dokumentu 5	Měřítko
			Datum vydání 16.04.2019	Jazyk CZ
			List 1 / 1	1/1

## F PŘÍLOHA 6 - FOTODOKUMENTACE



Obr. F.1: Detail na tiskovou hlavu



Obr. F.2: Pohled ze shora na osy X, Y



Obr. F.3: Detail na řemenici



Obr. F.4: Uložení tiskové desky